



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

*“Conéctate con un científico y te estarás conectando con un niño”*

*Ray Bradbury*





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# MODELADO Y CONTROL DE UN SCARA UTILIZANDO TÉCNICAS PARA LA REDUCCIÓN DE OSCILACIONES DURANTE LA EJECUCIÓN DE TRAYECTORIAS EN EL INSTITUTO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS DE LA UNIVERSIDAD DE HANNOVER, BAJA SAJONIA, ALEMANIA

**Autor:**

Iván Isaías Barona Zamora

**Director:**

Ing. Andrés Marcelo Gordón Garcés



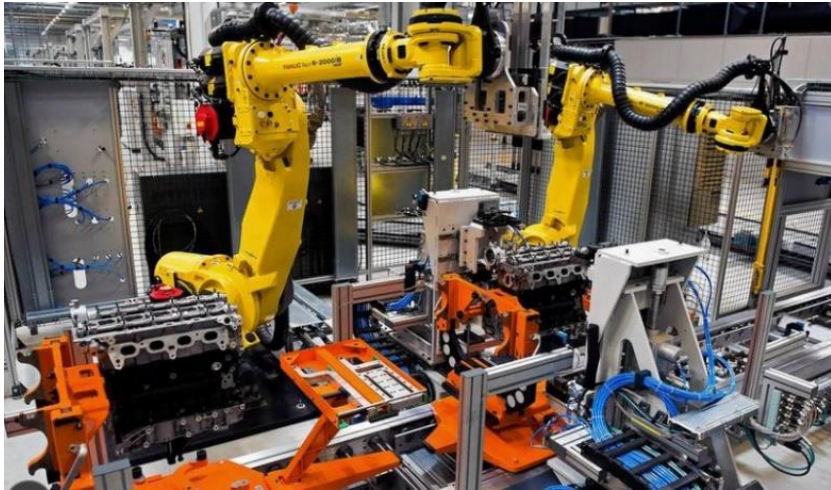
# AGENDA

- Antecedentes
- Justificación e Importancia
- Objetivo General
- Objetivos Específicos
- Fundamentación Teórica
- Modelado del Robot
- Control del Robot
- Pruebas y Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones



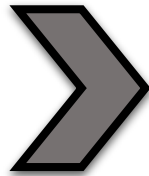
# ANTECEDENTES

## ROBOTS INDUSTRIALES



<https://goo.gl/J5Ef7X>

Repetitividad  
Precisión  
Velocidad

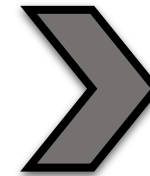


## SCARA



<https://goo.gl/vbwkqD>

Creado en 1979 en la  
Universidad de  
Yamanashi



## INSTITUTO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS



Simulación de  
un proceso de  
manipulación



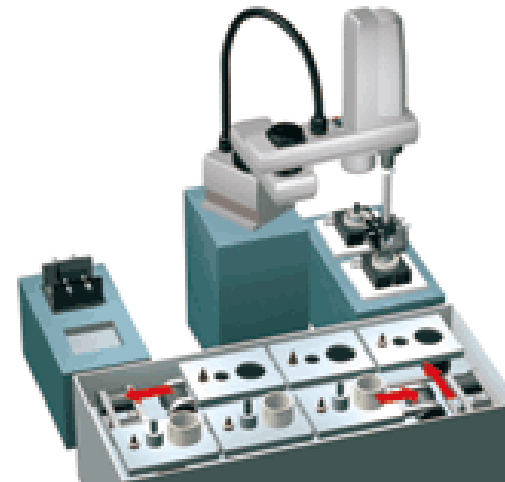
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA



Automatización

- Precisión en procesos de ensamblaje
- Inspección de productos terminados
- Atornillado de piezas



<https://goo.gl/sfNpq1>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

- Modelar y controlar un SCARA utilizando técnicas para la reducción de oscilaciones durante la ejecución de trayectorias de pick and place.



# OBJETIVOS

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de herramientas matemáticas para localización espacial, cinemática, dinámica y control con métodos de reducción de oscilaciones.
- Resolver matemáticamente la cinemática y dinámica del SCARA del laboratorio.
- Analizar el modelo matemático haciendo uso de software de ingeniería.
- Controlar la posición y orientación del efector final para ejecutar diferentes trayectorias aplicando métodos de reducción de oscilaciones.
- Realizar pruebas de funcionamiento en la fábrica a escala dentro del Instituto de Sistemas Mecatrónicos de la Universidad de Hannover.



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## ROBOTS CON ELEMENTOS FLEXIBLES

### Articulaciones

- Bandas de transmisión
- Ejes largos
- Rigidez propia de cables
- Harmonic drives
- Acoplamientos elásticos



### Eslabones



[goo.gl/sszVXS](https://goo.gl/sszVXS)



<https://goo.gl/6rMnhL>

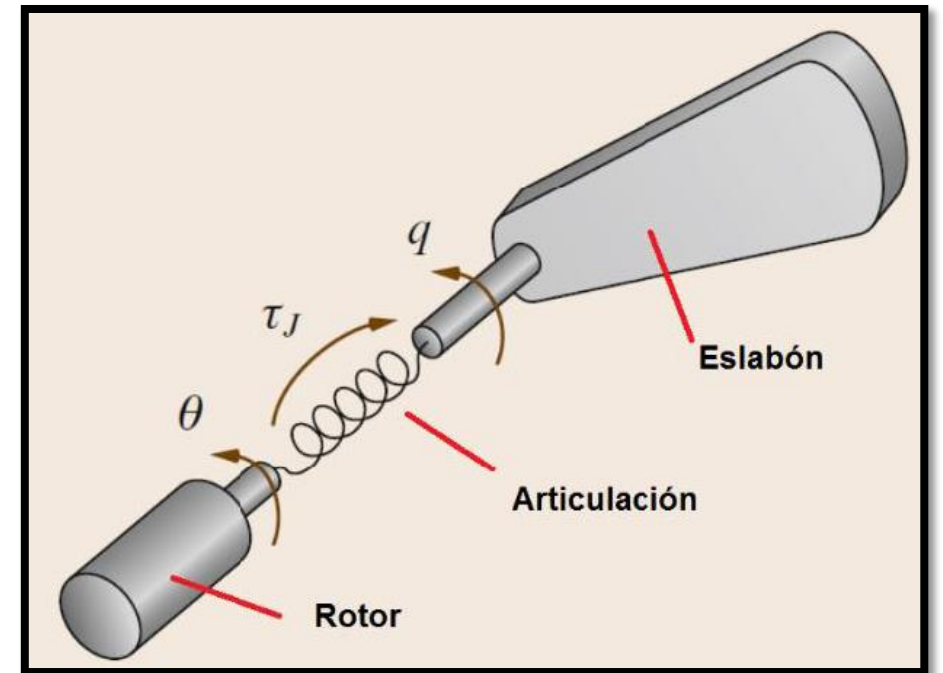




# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## MODELAMIENTO DINÁMICO

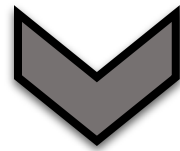
1. Elasticidad estimada como lineal
2. Los rotores son cuerpos uniformes que tienen sus centros de masa en los ejes de rotación.
3. Cada motor está localizado en una posición anterior al eslabón que controla.



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

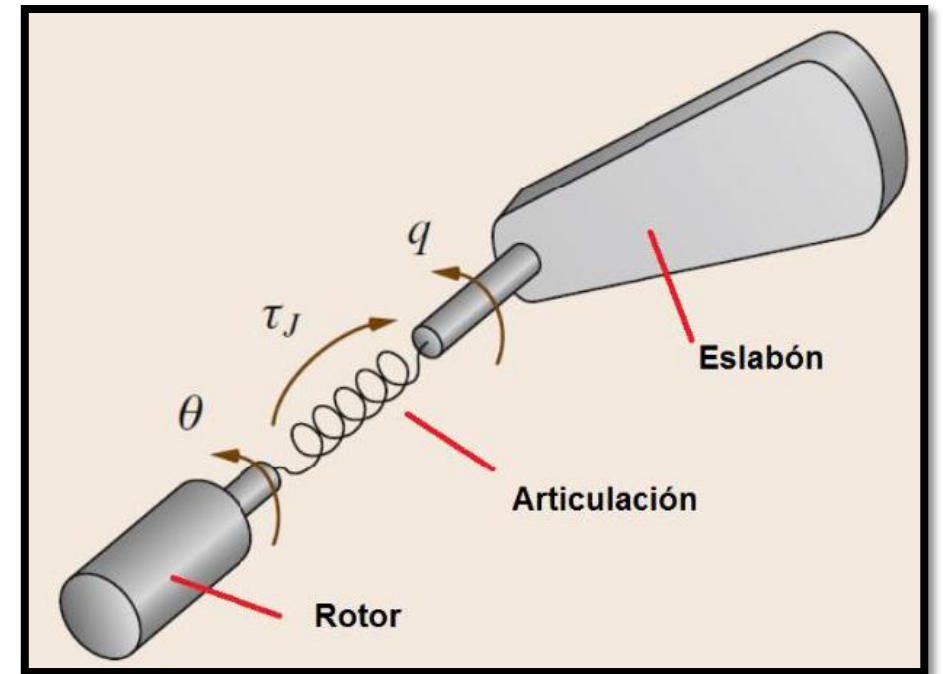
## MODELAMIENTO DINÁMICO

$$\Theta = \begin{pmatrix} q \\ \theta \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2N}$$



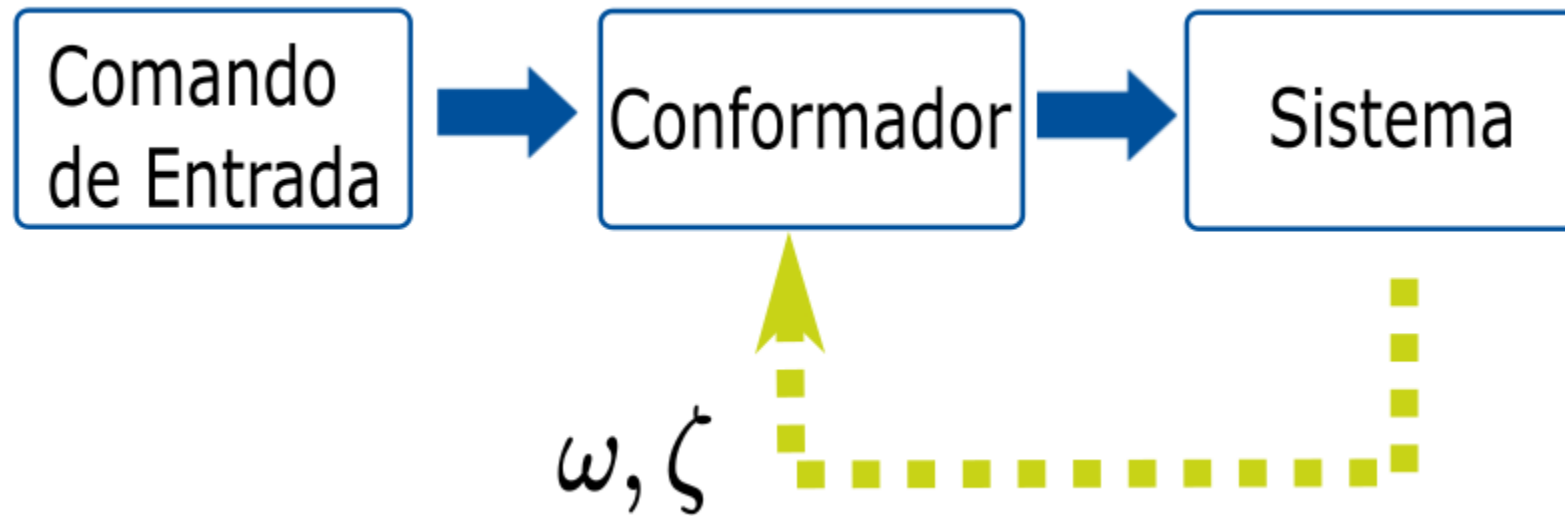
$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + g(q) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) + F_q \dot{q} = 0$$

$$B\ddot{\theta} + D(\dot{\theta} - \dot{q}) + K(\theta - q) + F_{\theta} \dot{\theta} = \tau$$



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## CONFORMACIÓN DE ENTRADA



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## CONFORMACIÓN DE ENTRADA

GRÚA



MOVIMIENTO

CARGA ÚTIL

<https://goo.gl/n2uumM>

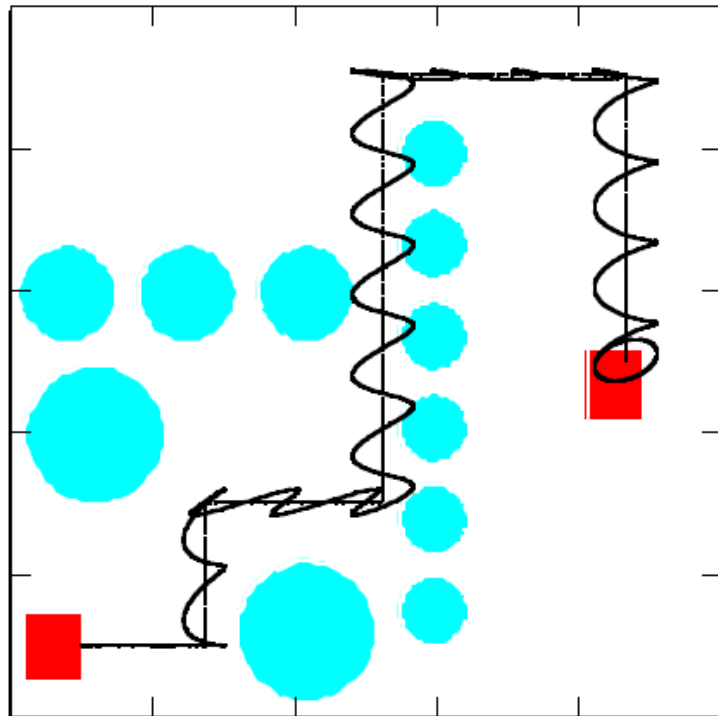
OSCILACIONES  
RESIDUALES



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

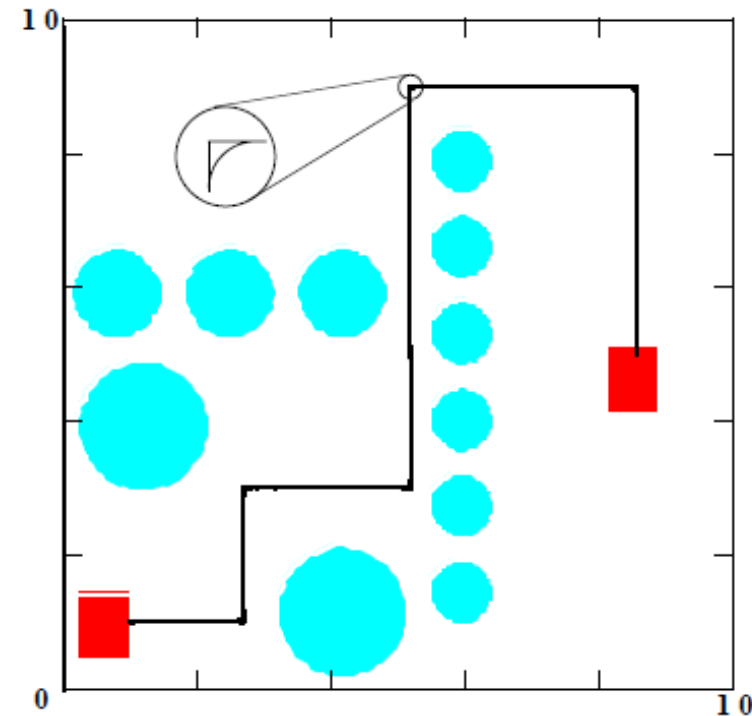
## CONFORMACIÓN DE ENTRADA

SIN CONFORMACIÓN



W.E. Singhose  
Georgia Institute of Technology

CON CONFORMADOR



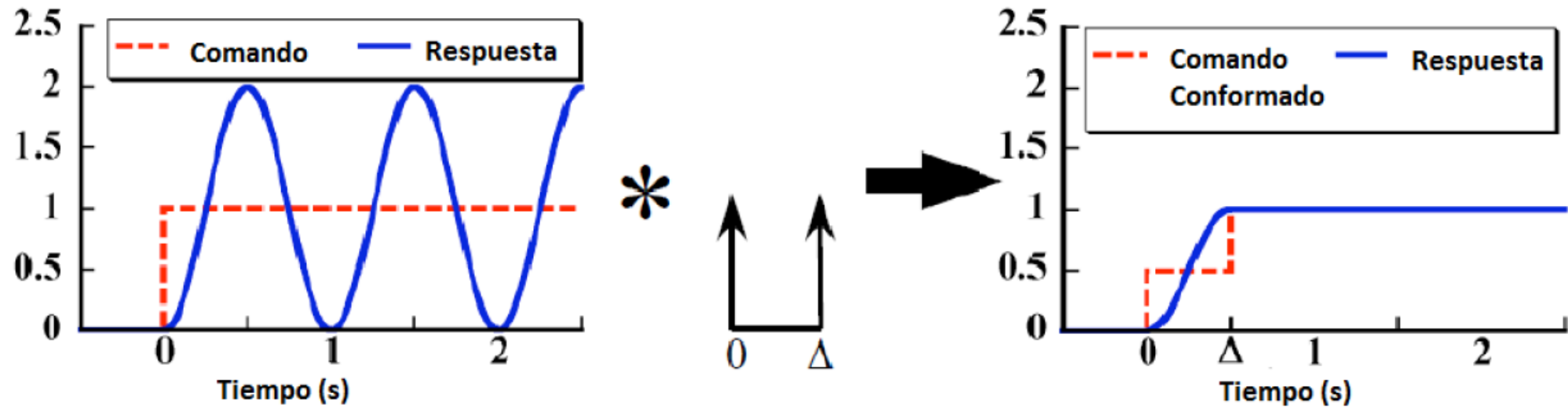
W.E. Singhose  
Georgia Institute of Technology



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

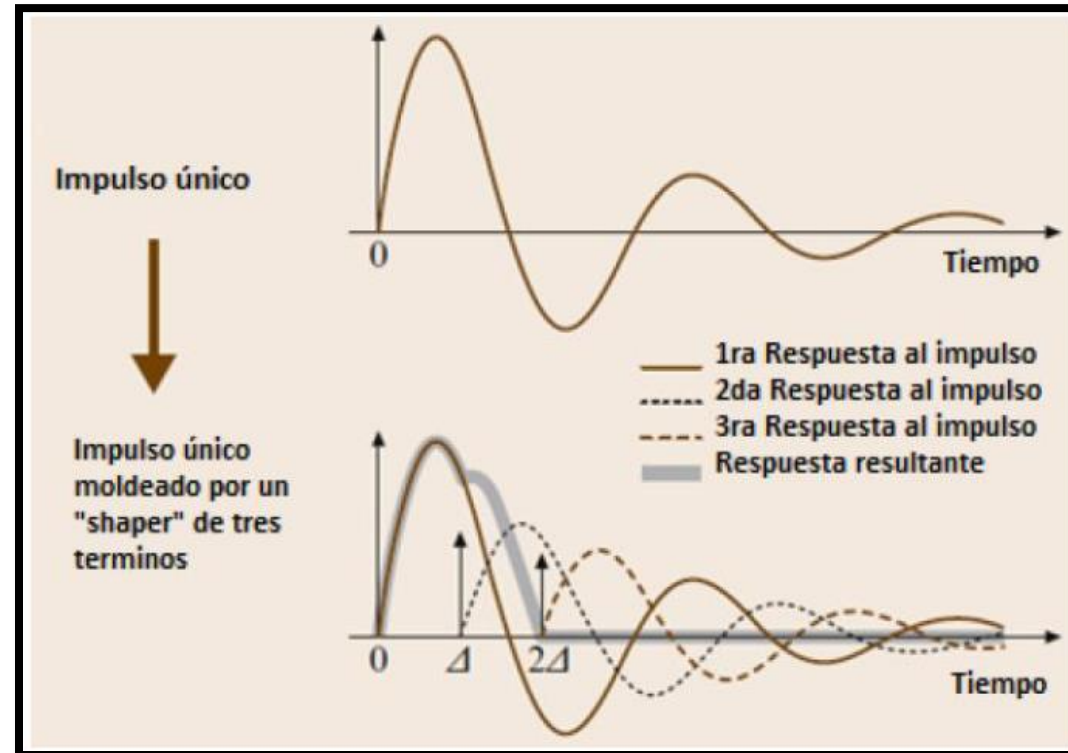
# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## CONFORMACIÓN DE ENTRADA



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

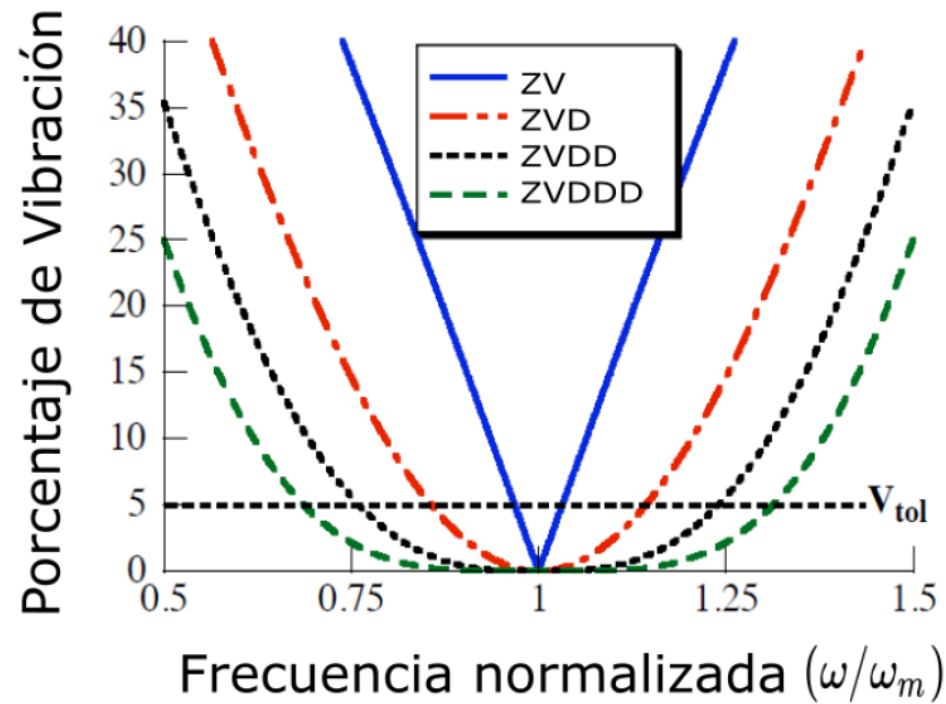
## CONFORMACIÓN DE ENTRADA



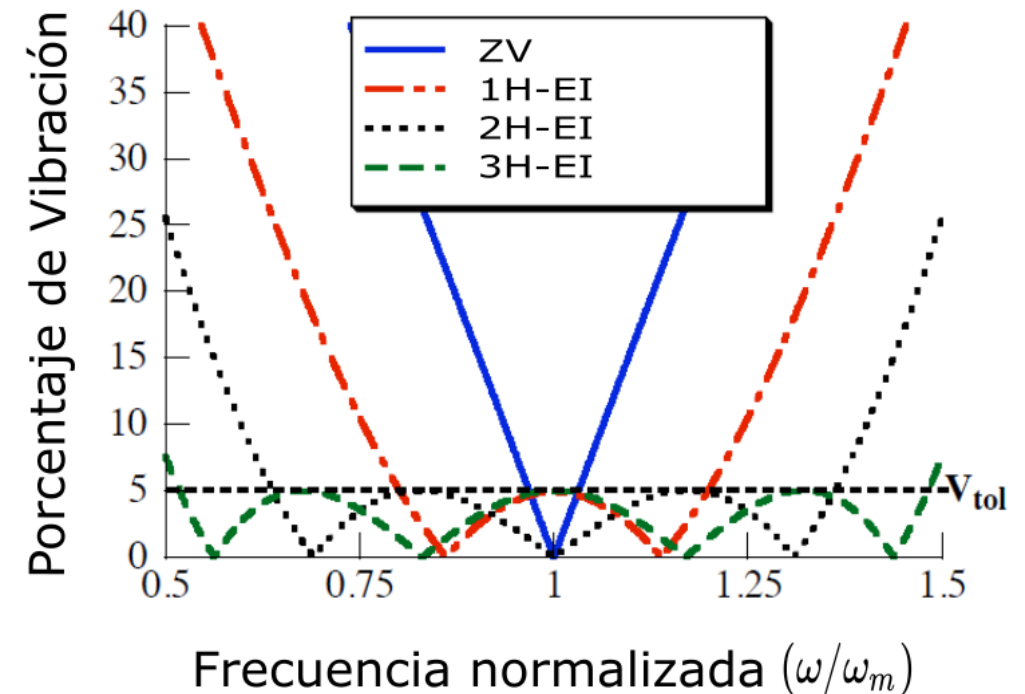
# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## TIPOS DE CONFORMADORES

### Derivativos



### Extra Insensibles





# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

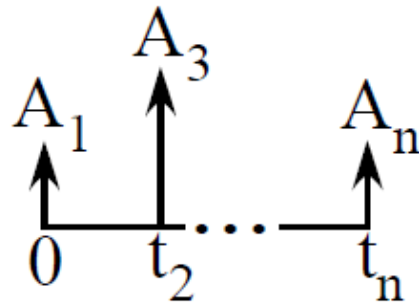
## ESTRUCTURA DE UN CONFORMADOR

$$ZV = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1 + K & \frac{K}{s} \\ 0 & \frac{\tau_d}{s} \end{bmatrix}$$

$K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

$\tau_d = \frac{2\pi}{\omega_d}$

AMPLITUDES



TIEMPOS



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## ESTRUCTURA DE UN CONFORMADOR

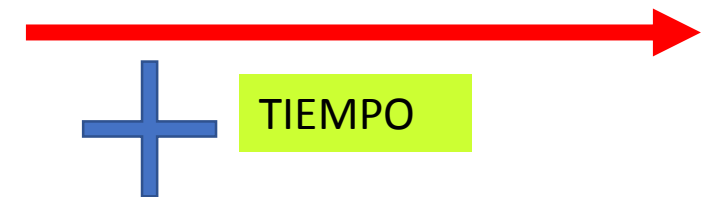
### Vibración Cero

$$ZV = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & K \\ 1 + K & 1 + K \\ 0 & \frac{\tau_d}{s} \end{bmatrix}$$



### Vibración cero y triple derivada

$$ZVDDD = \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 4K & 6K^2 & 4K^3 & K^4 \\ \frac{1}{D} & \frac{4K}{D} & \frac{6K^2}{D} & \frac{4K^3}{D} & \frac{K^4}{D} \\ 0 & \frac{\tau_d}{2} & \tau_d & \frac{3}{2}\tau_d & 2\tau_d \end{bmatrix}$$



# FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN

MÁQUINAS DE MEDICIÓN  
POR COORDENADAS



es.wikipedia.org

ROBOT HIDRÁULICO DE  
ELEVACIÓN PESADA



<https://goo.gl/4iE1mE>

ROBOTS DE MANEJO  
DE OBLEAS



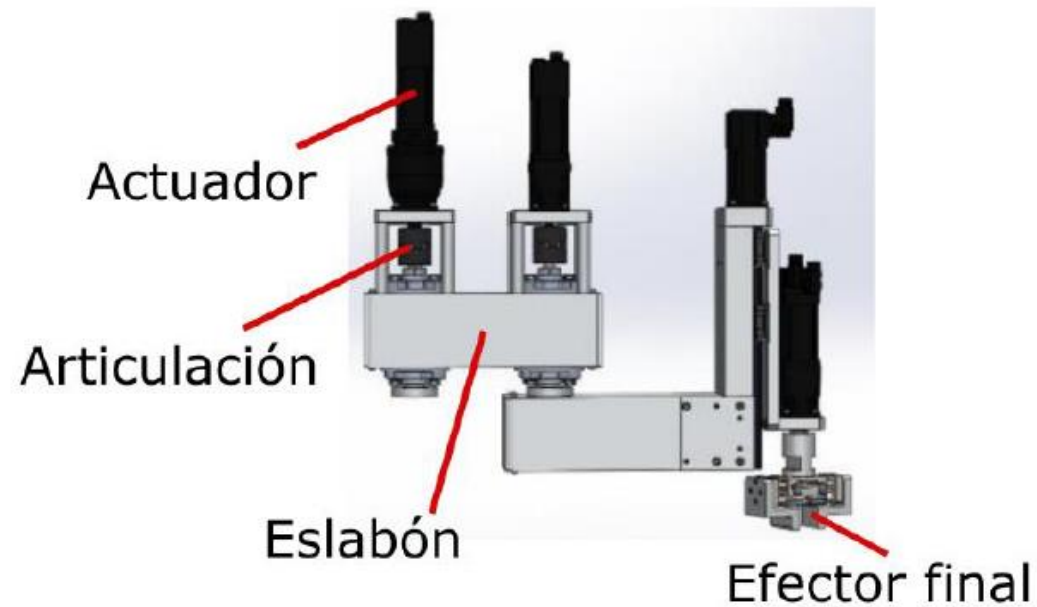
<https://goo.gl/u52pVs>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

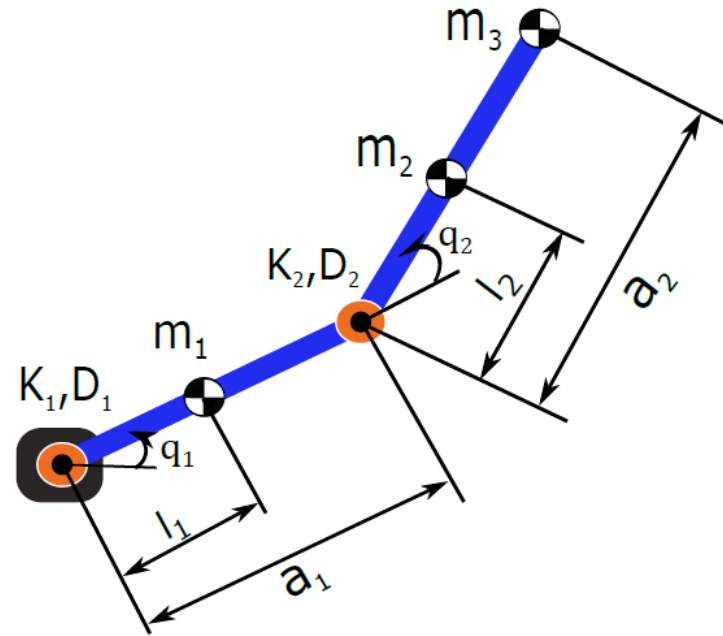
# MODELADO DEL ROBOT

## IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS



# MODELADO DEL ROBOT

## MODELO



$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) = 0$$



AMORTIGUAMIENTO

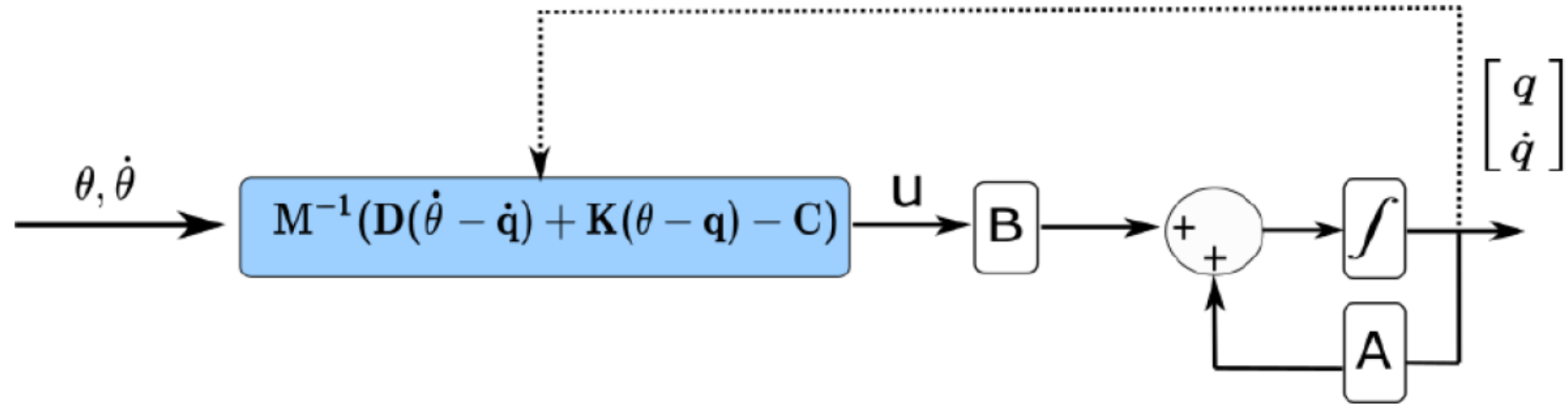


ELASTICIDAD



# MODELADO DEL ROBOT

## ALGORITMO PARA LA SOLUCIÓN DEL MODELO DINÁMICO



# MODELADO DEL ROBOT

## COMPROBACIÓN DE MODELO

$$a_1 = 0.5 \text{ m}$$

$$a_2 = 0.5 \text{ m}$$

$$l_1 = 0.25 \text{ m}$$

$$l_2 = 0.25 \text{ m}$$

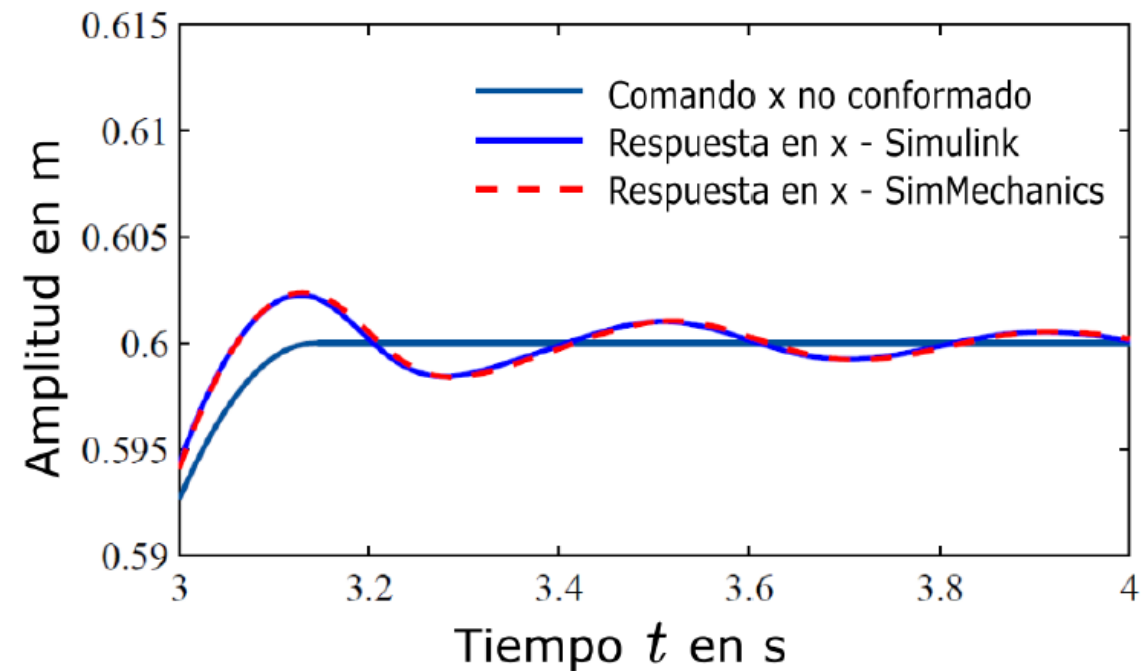
$$m_1 = 15 \text{ kg}$$

$$m_2 = 15 \text{ kg}$$

$$m_3 = 15 \text{ kg}$$

$$K_1 = K_2 = 3000 \text{ Nm/rad}$$

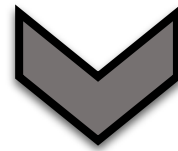
$$D_1 = D_2 = 40 \text{ Nms/rad}$$



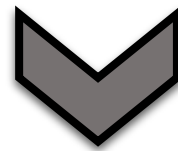
# MODELADO DEL ROBOT

## LINEALIZACIÓN

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + D(\dot{q} - \dot{\theta}) + K(q - \theta) = 0$$



LINEARIZACIÓN



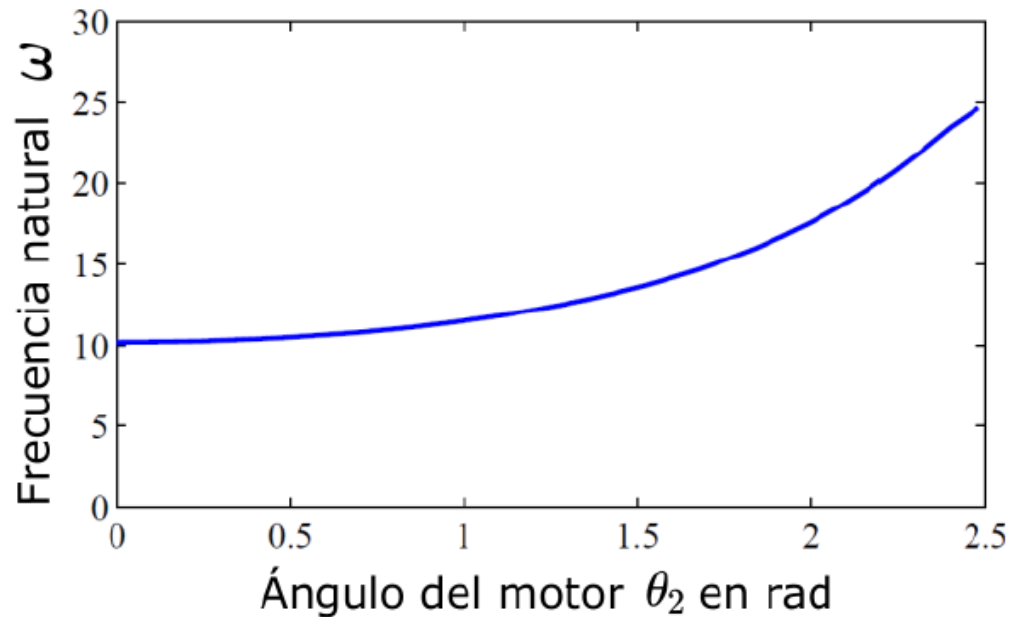
$$M(\theta)\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$





# CONTROL DEL ROBOT

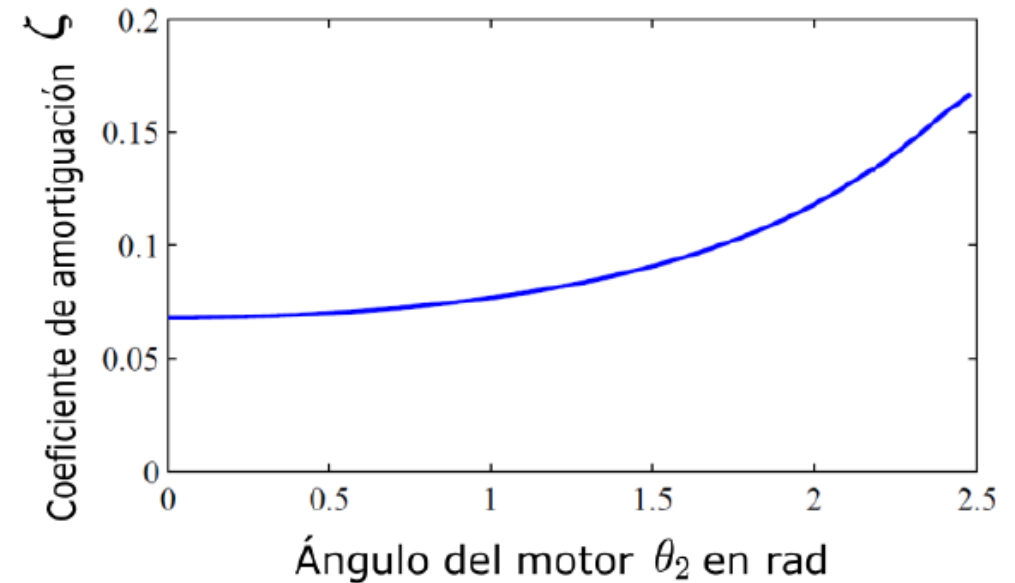
$$M(\theta)\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$



$$\omega = f(\theta_2)$$

$$\omega = 17,1102 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = 0.1174$$

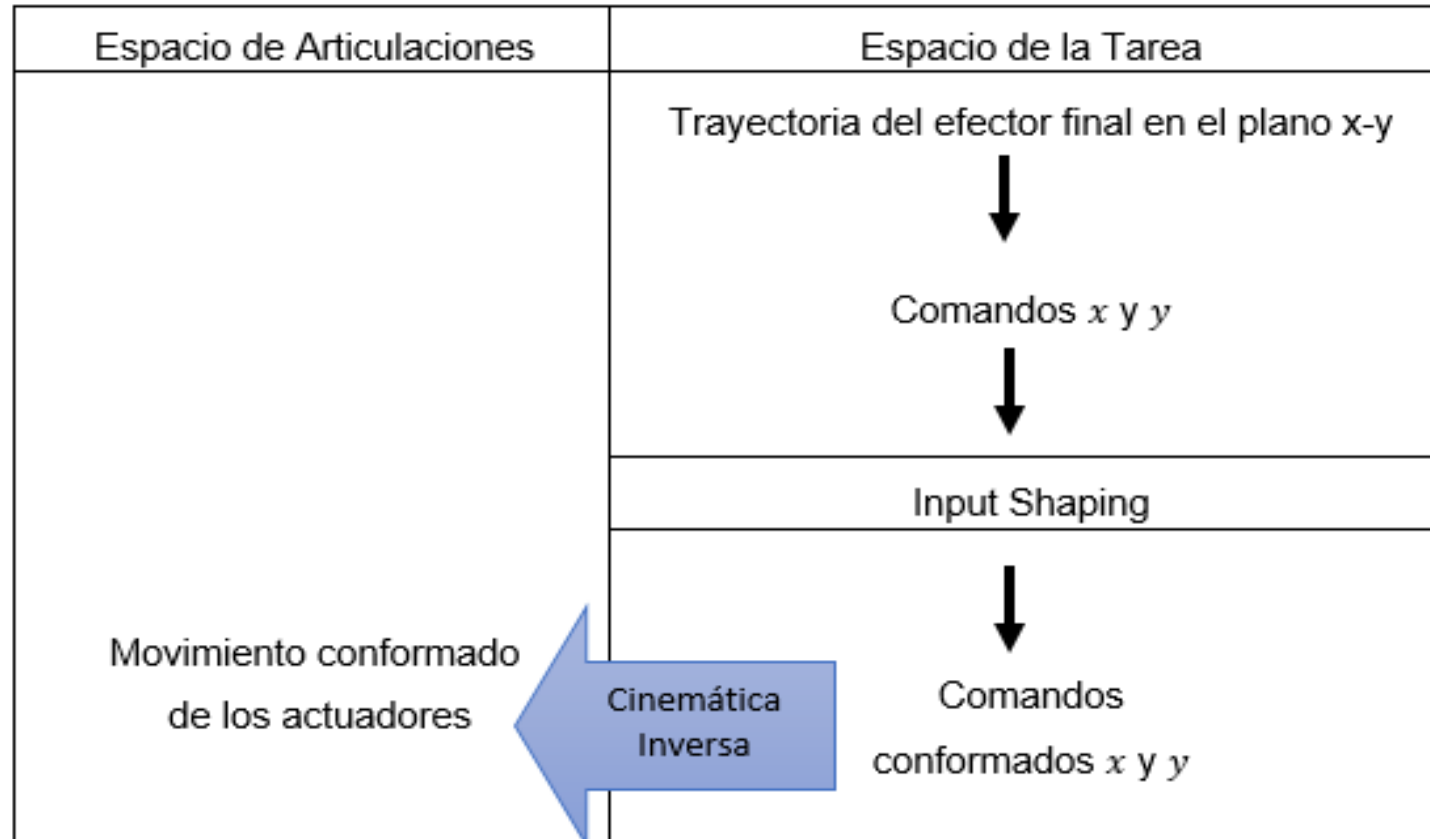


$$\zeta = f(\theta_2)$$



# CONTROL DEL ROBOT

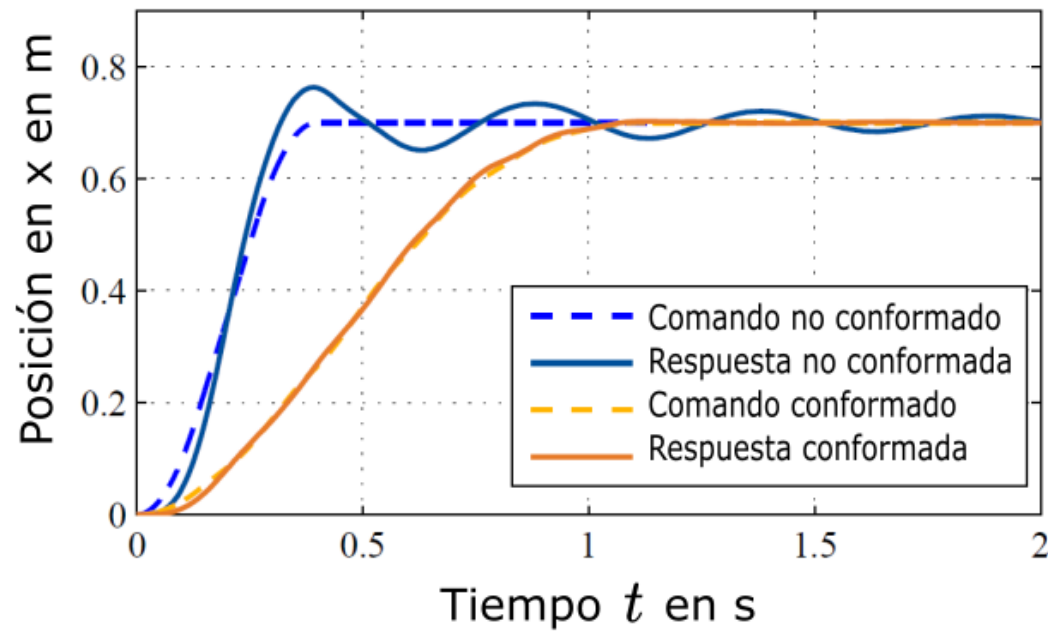
## PROCEDIMIENTO



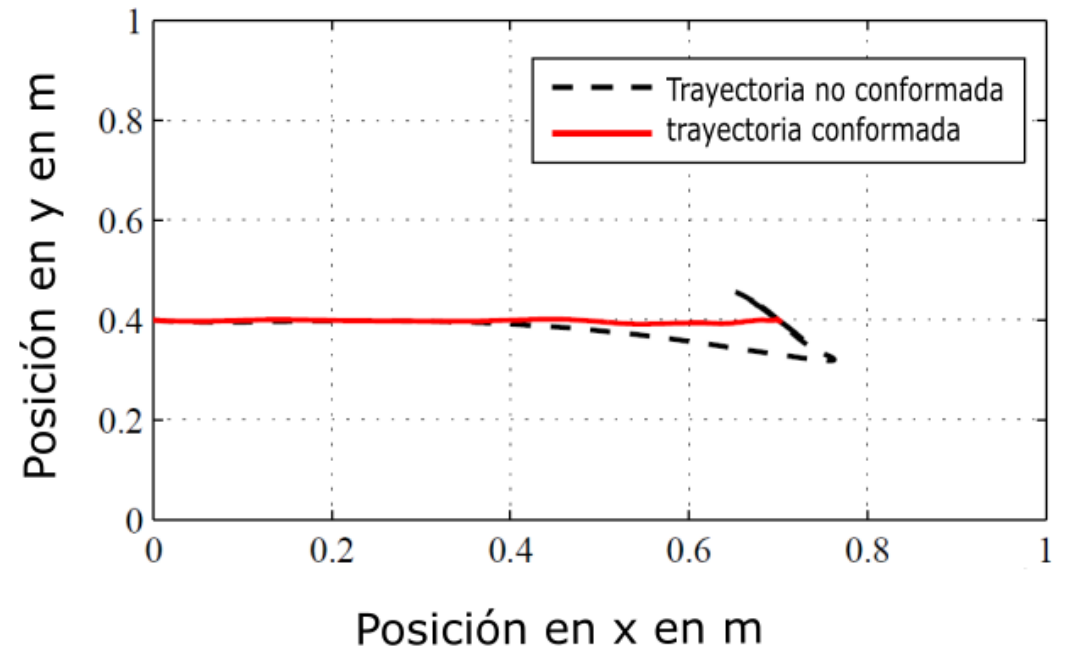
# CONTROL DEL ROBOT

## ALTERACIÓN EN LOS COMANDOS

### Alto tiempo de Transición



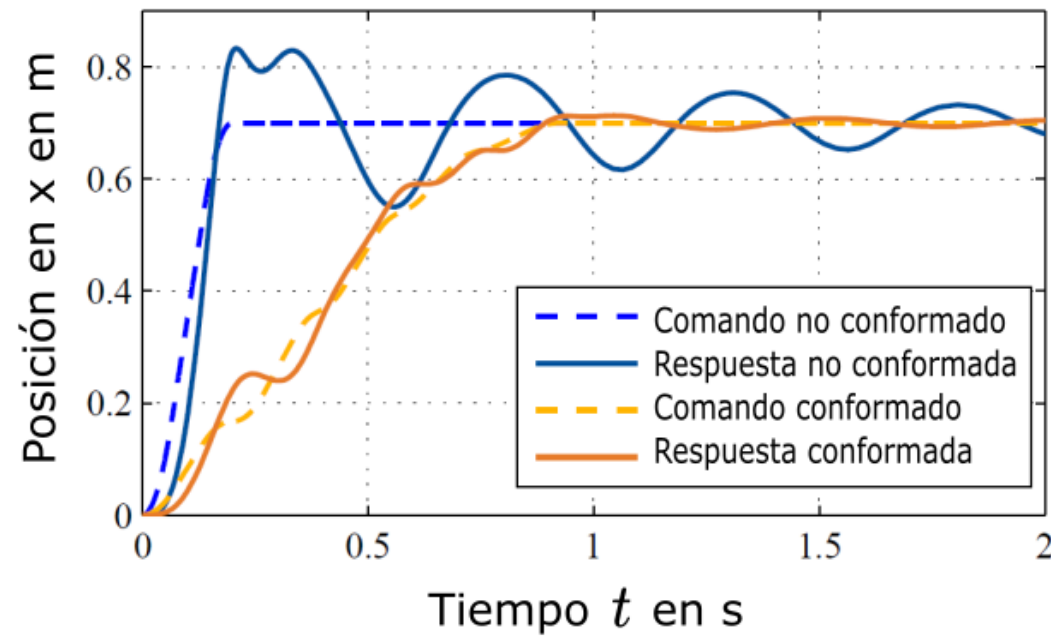
### Respuestas



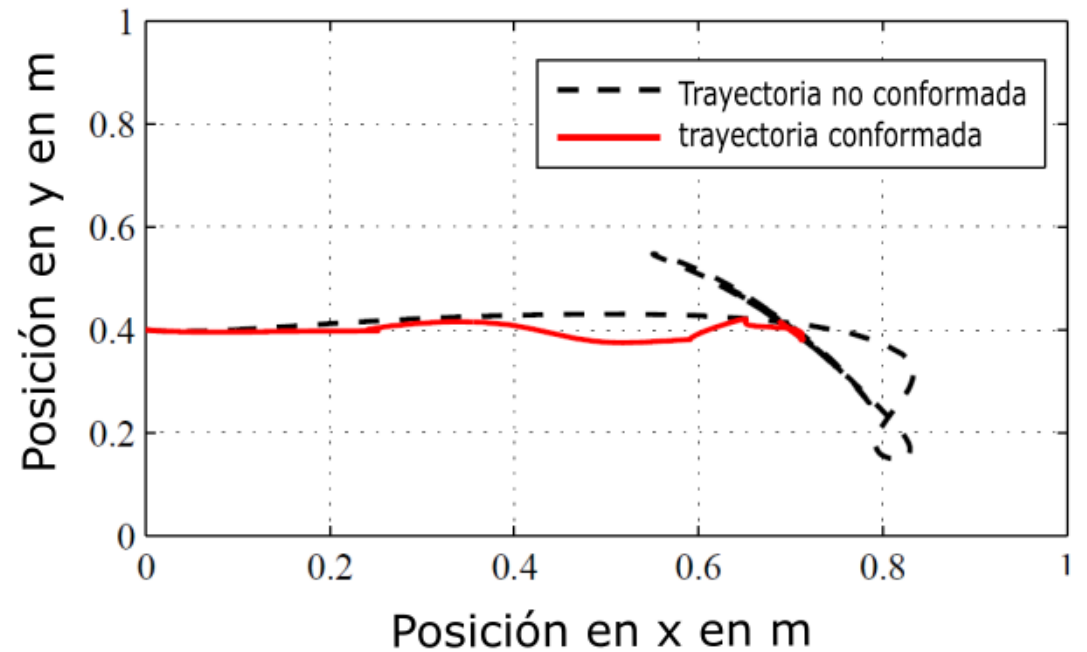
# CONTROL DEL ROBOT

## ALTERACIÓN EN LOS COMANDOS

### Bajo Tiempo de Transición



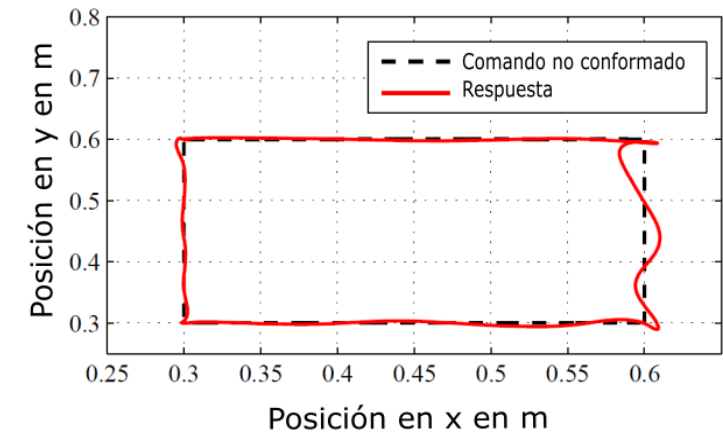
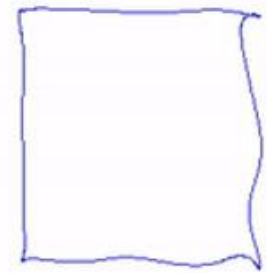
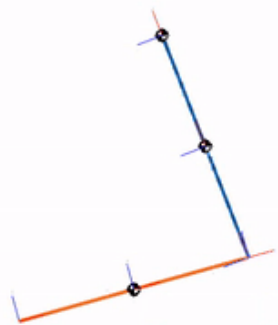
### Respuestas



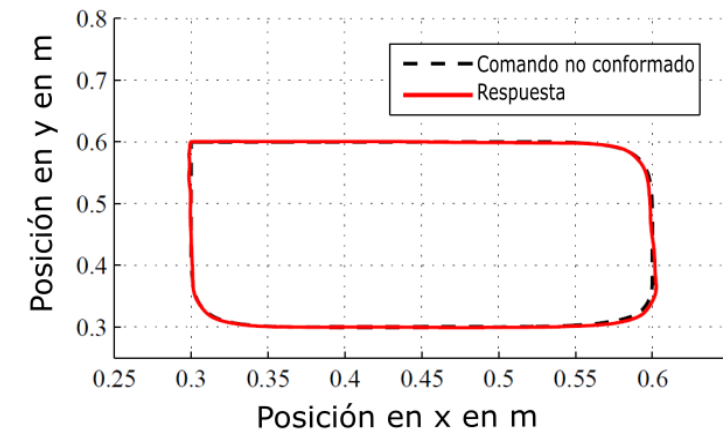
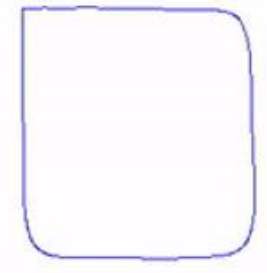
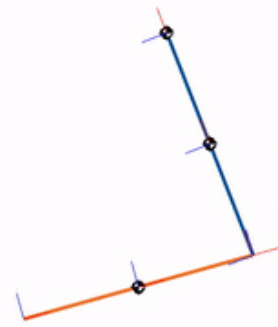
# CONTROL DEL ROBOT

## COMPARACIÓN

Caso no conformado



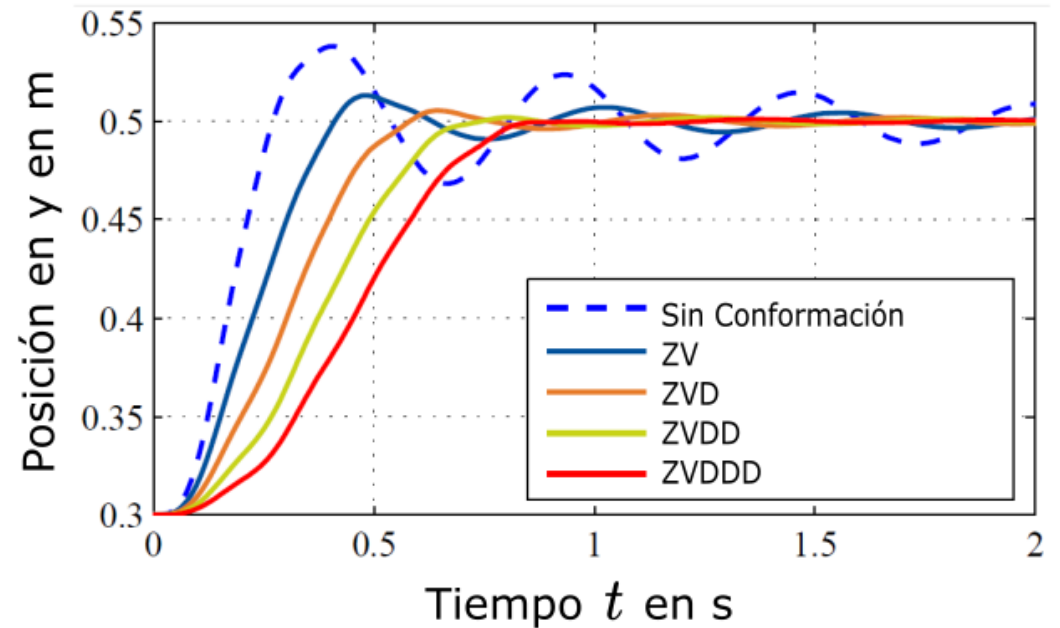
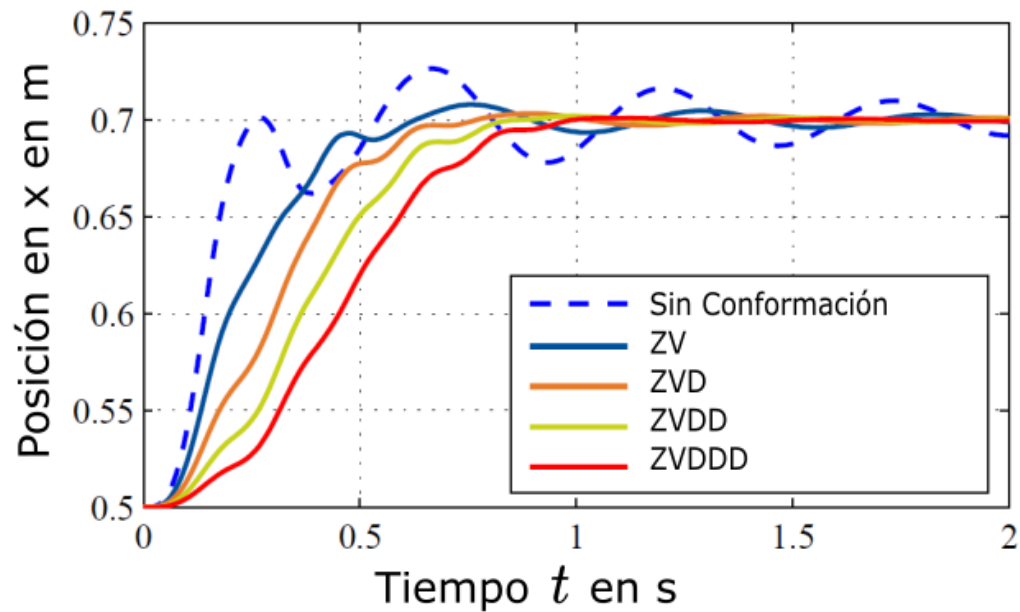
Caso Conformado



# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE CONFORMADORES

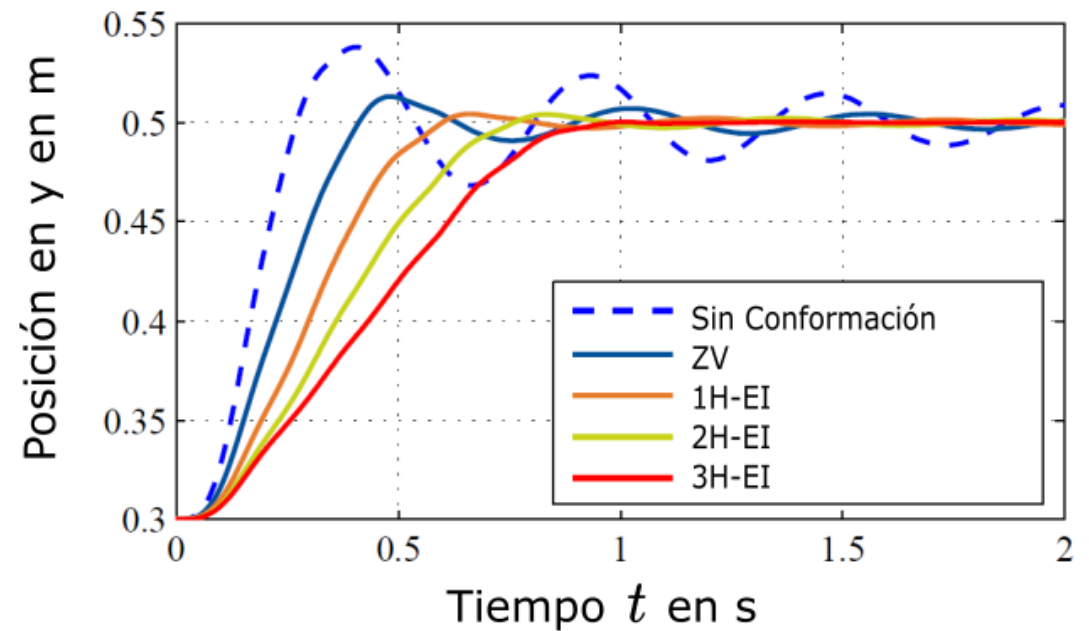
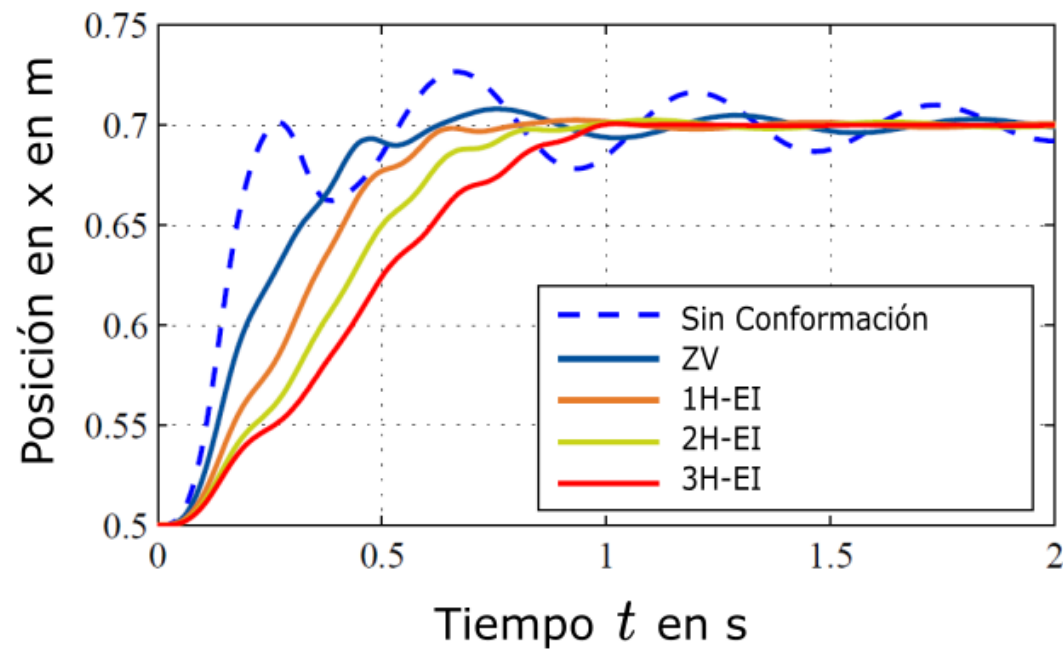
### Respuestas con Conformadores Derivativos



# CONTROL DEL ROBOT

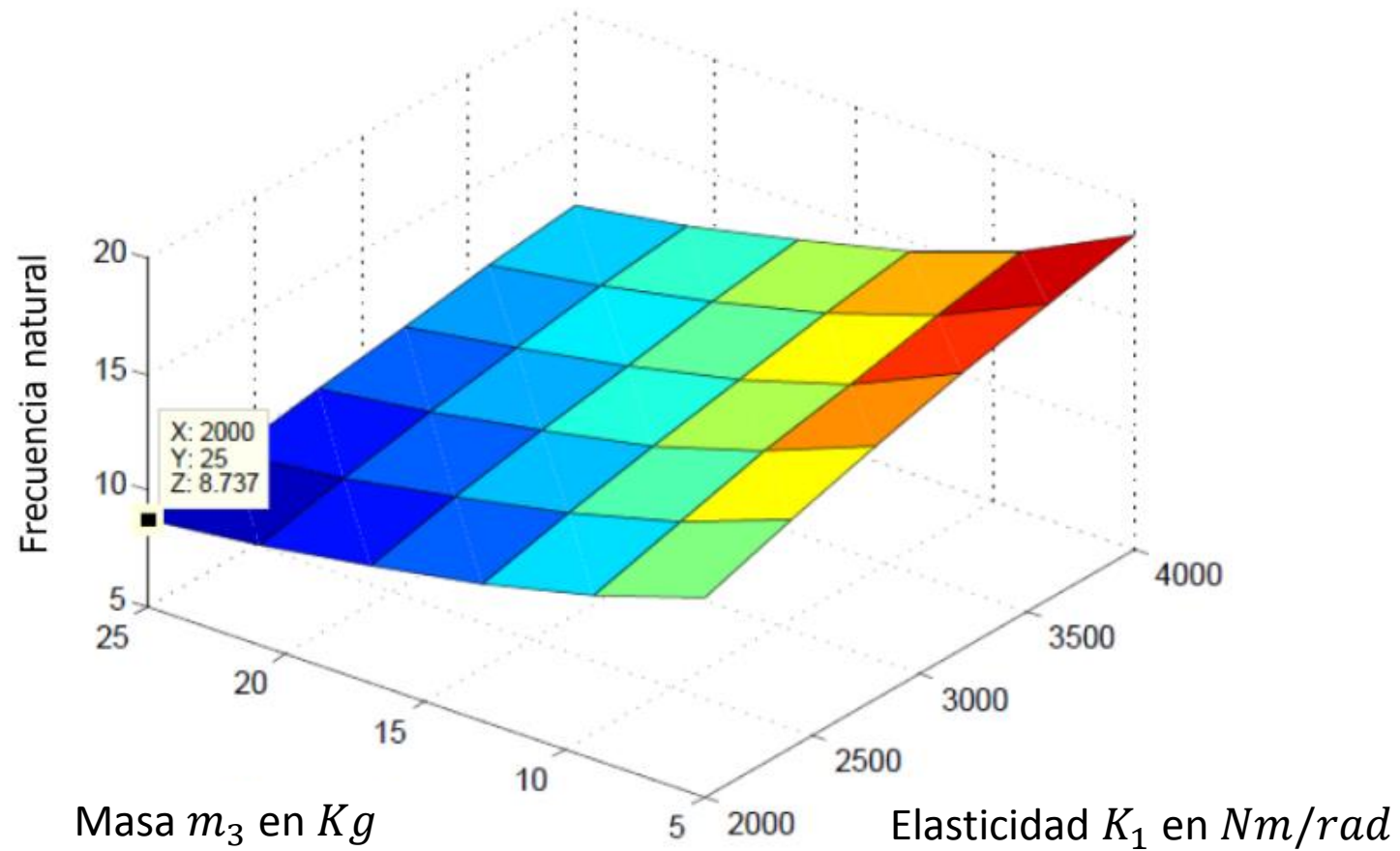
## PRUEBA DE CONFORMADORES

### Respuestas con Conformadores Extra Insensitivos



# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

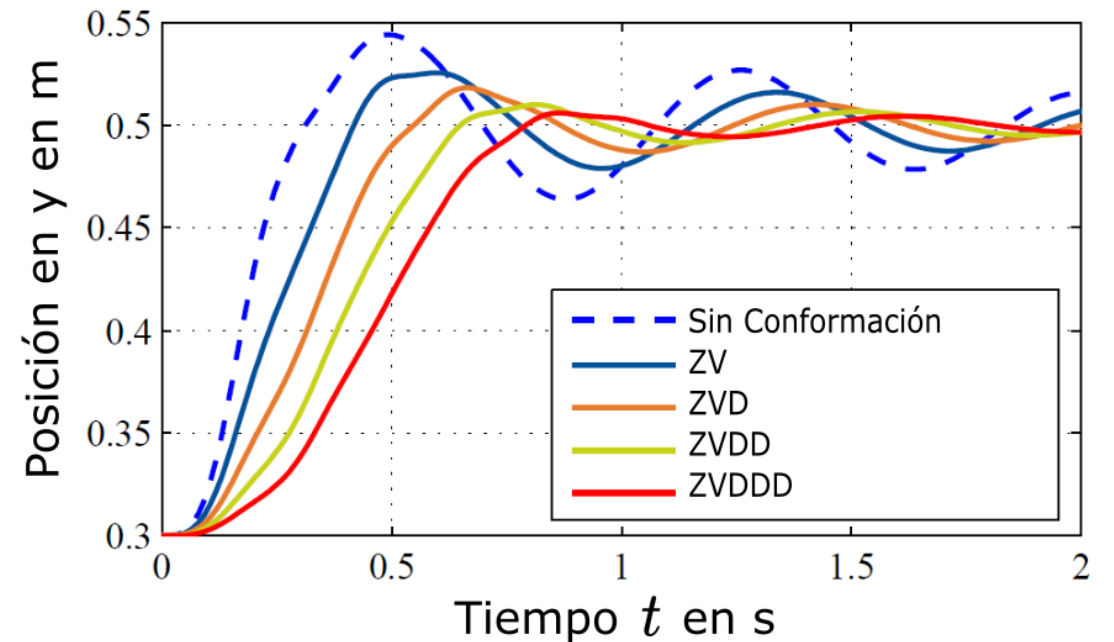
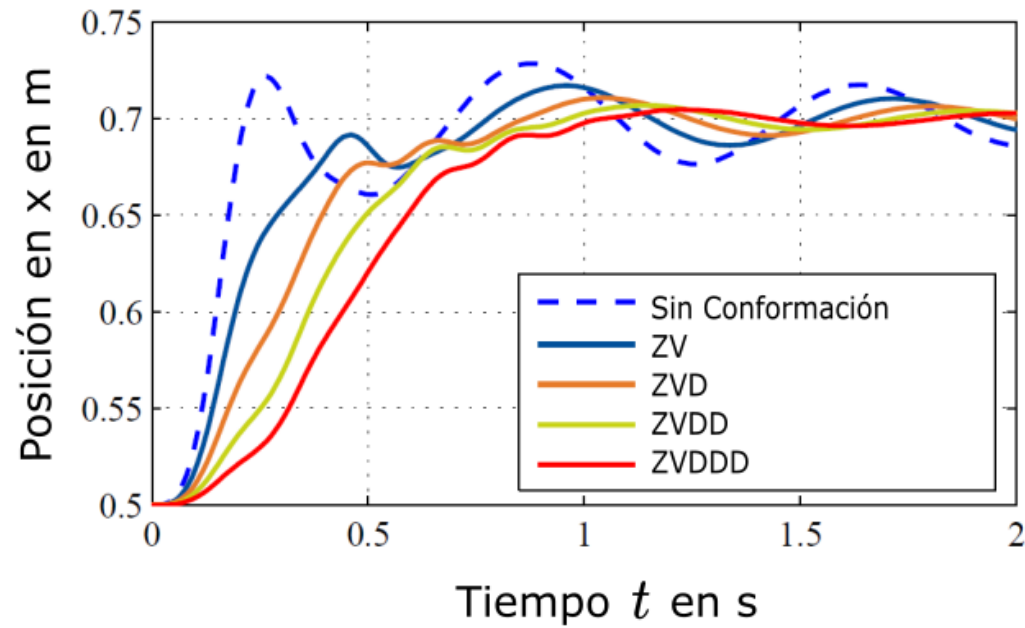




# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

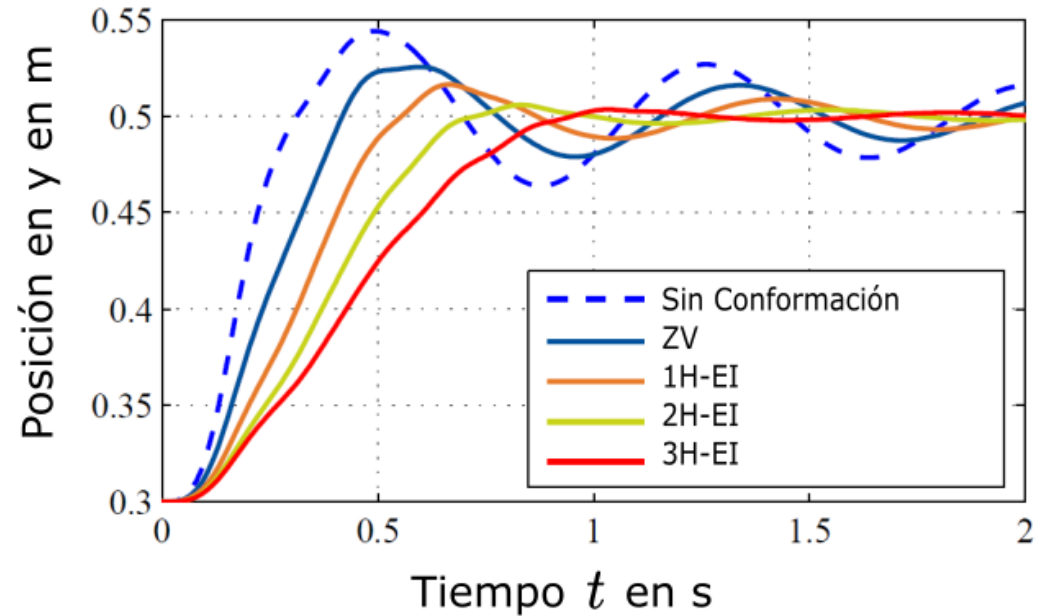
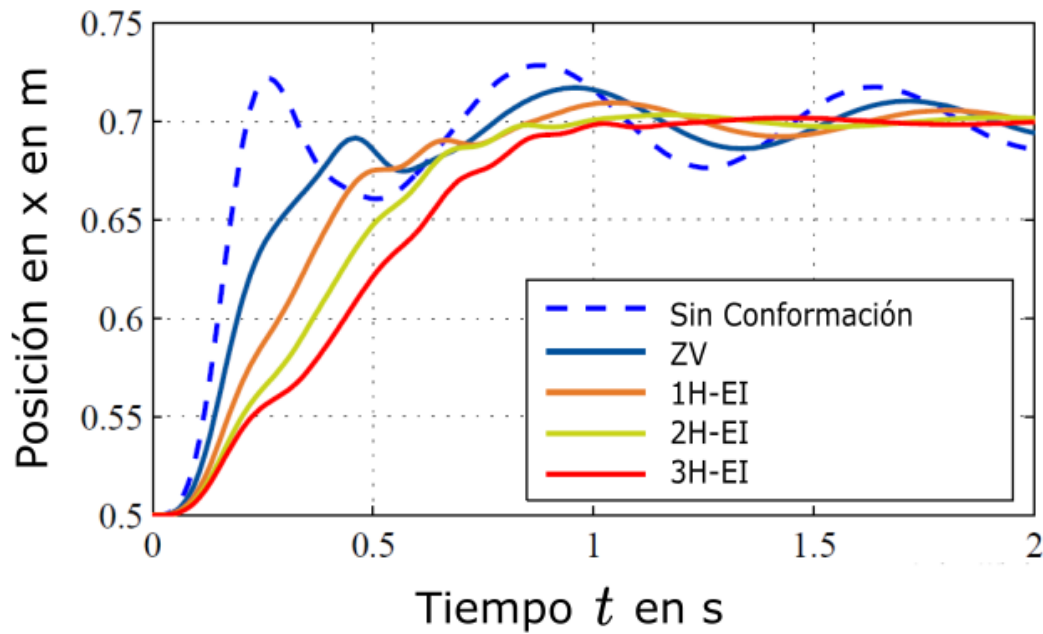
### Respuestas con Conformadores Derivativos



# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

### Respuestas con Conformadores Extra Insensitivos

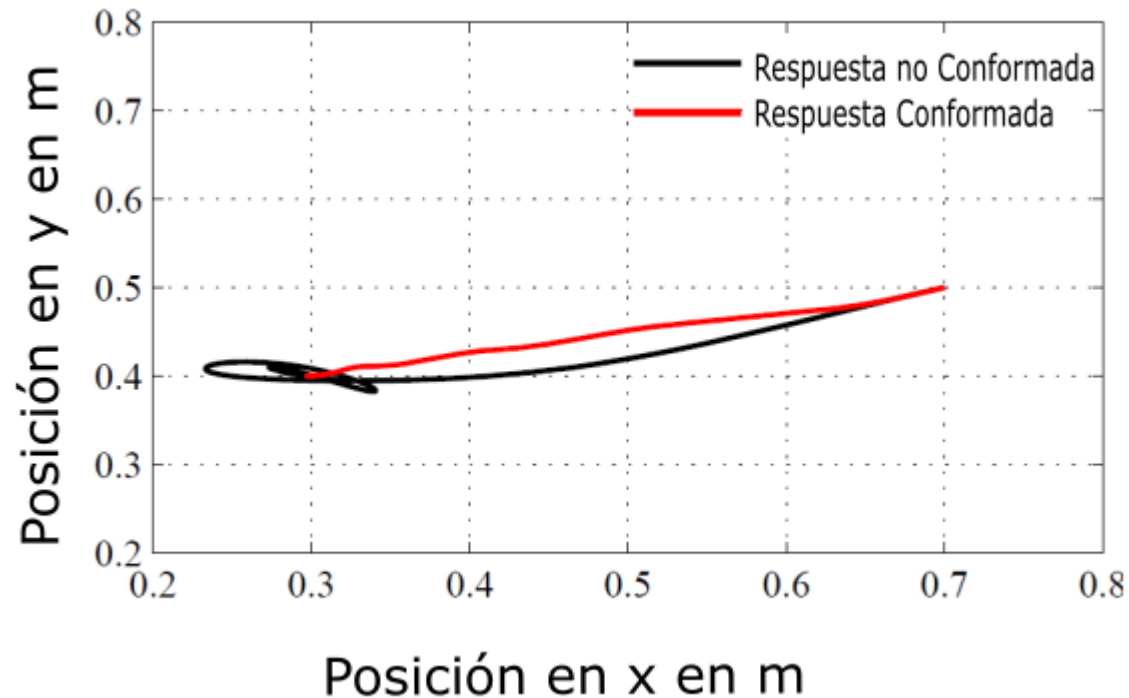


# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

- Trayectoria

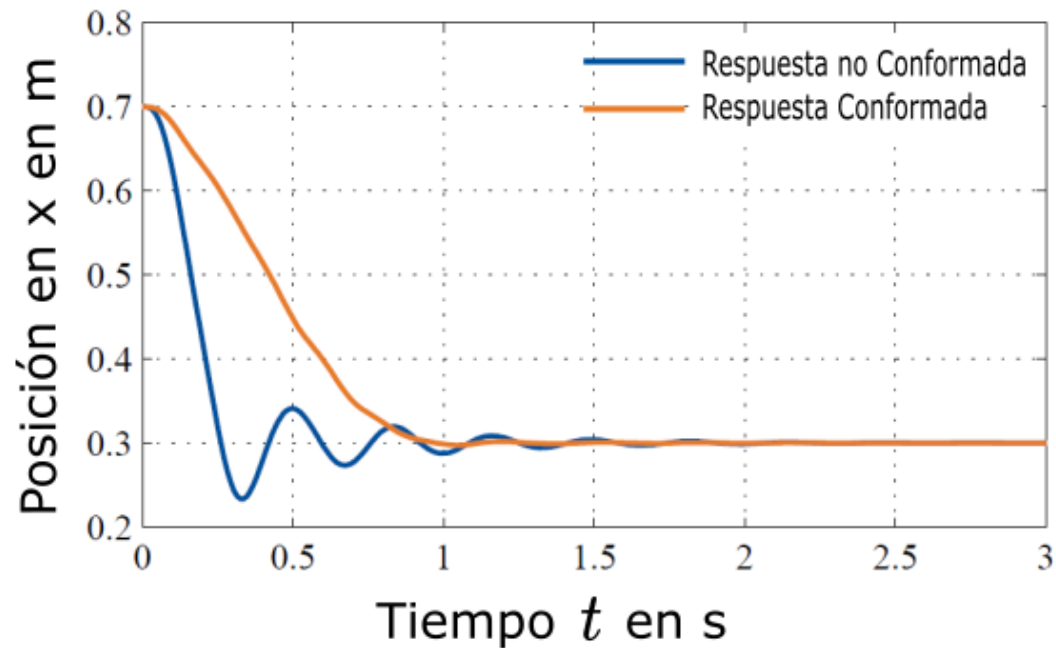
Reducción de sobre impulso:  
**95.44%**



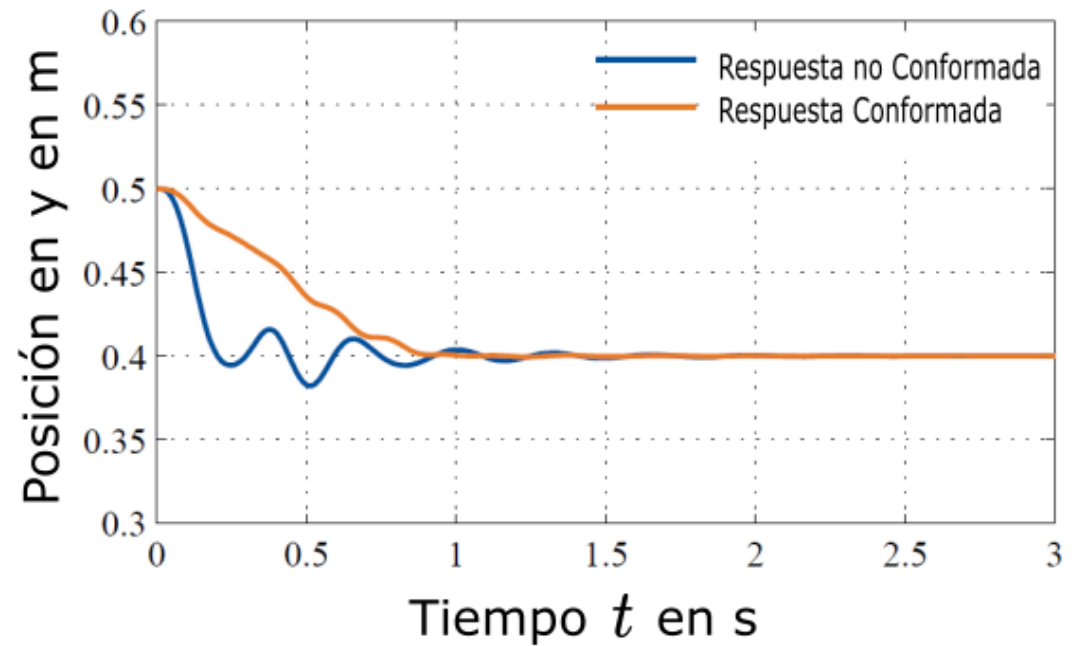
# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

### Respuesta en X



### Respuesta en Y

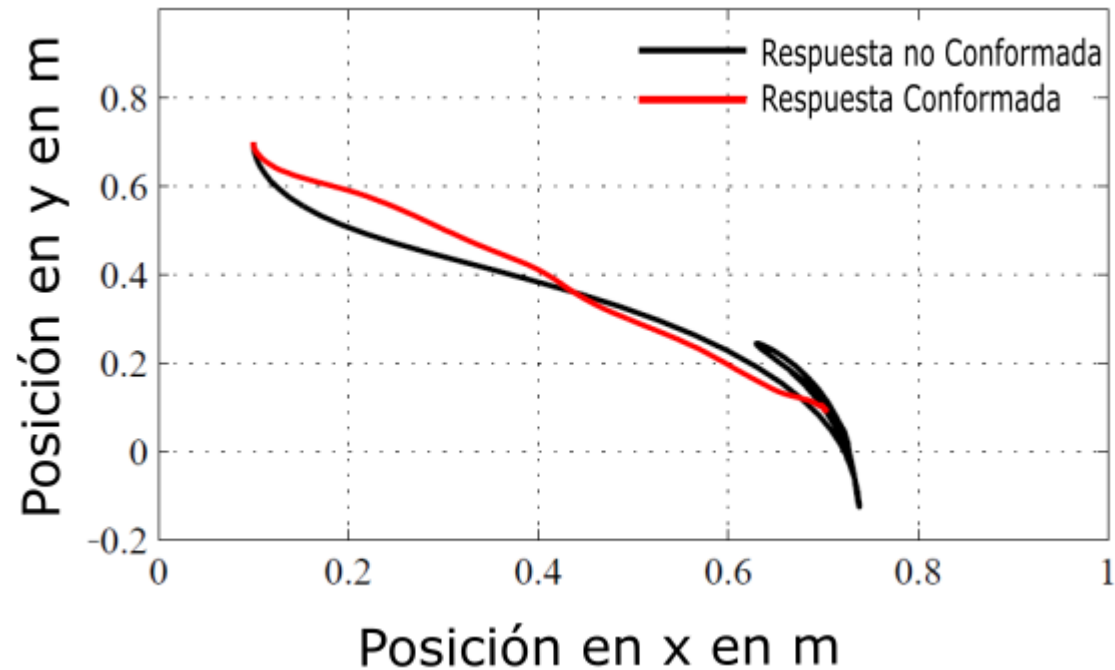


# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

- Trayectoria

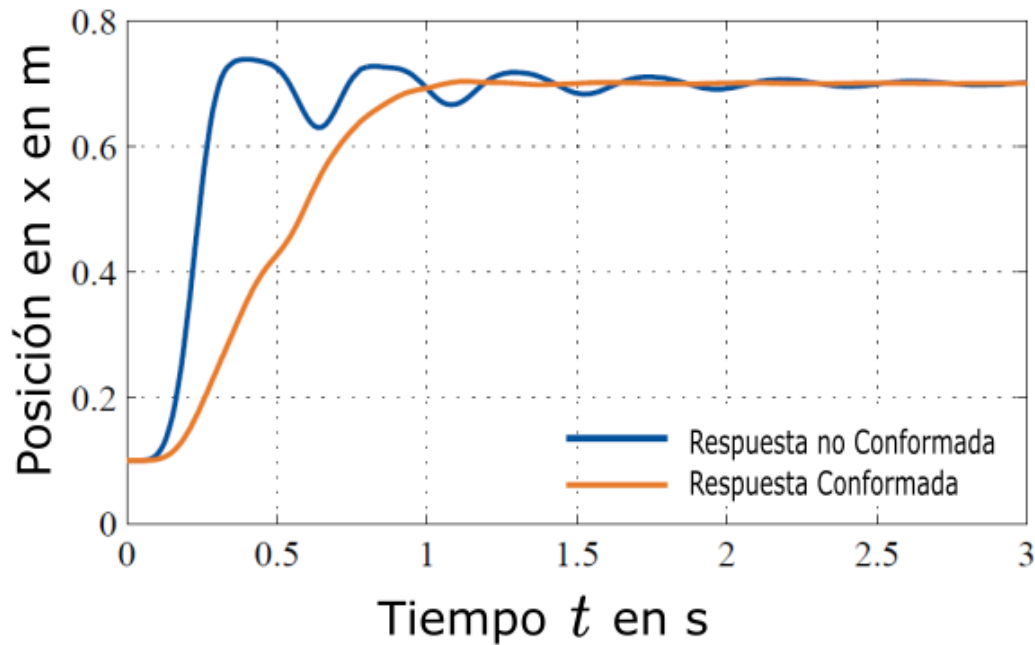
Reducción de sobre impulso:  
95.96%



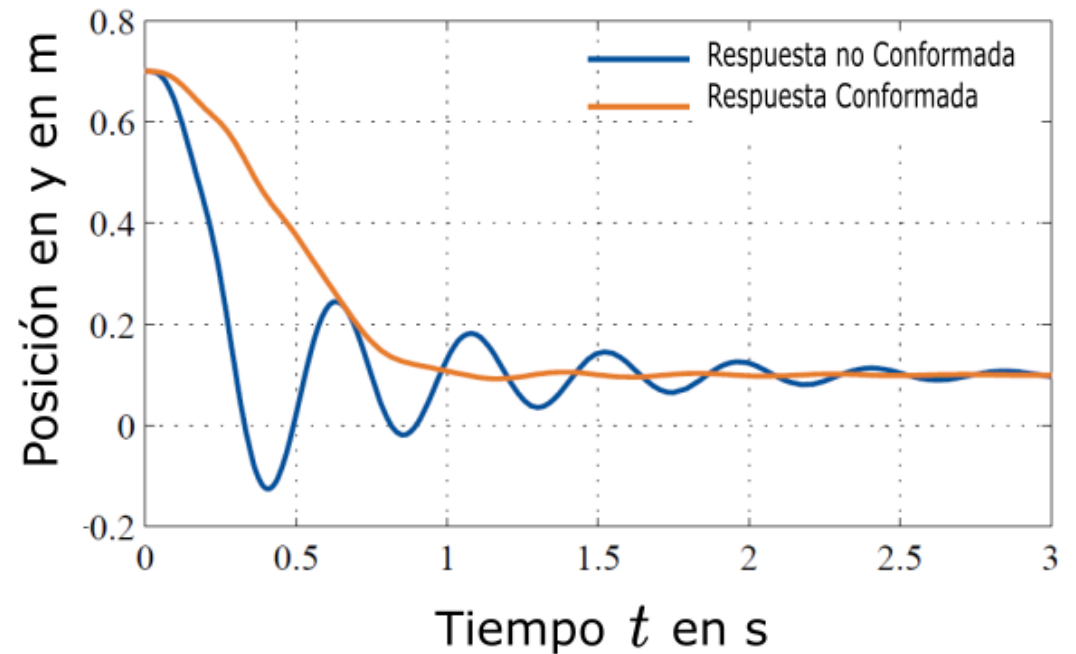
# CONTROL DEL ROBOT

## PRUEBA DE ROBUSTEZ

### Respuesta en X



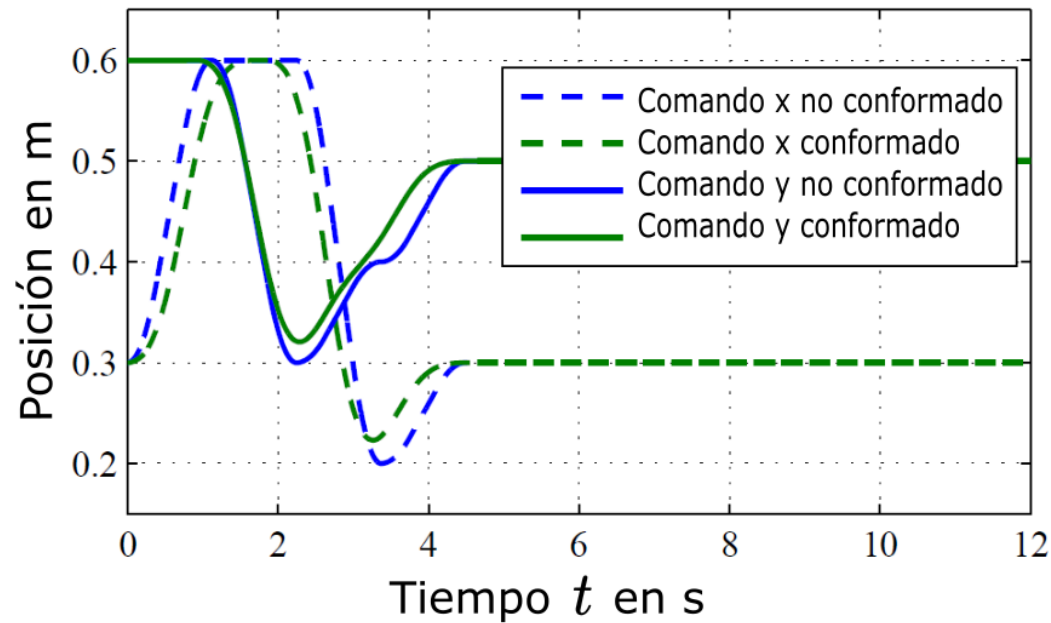
### Respuesta en Y



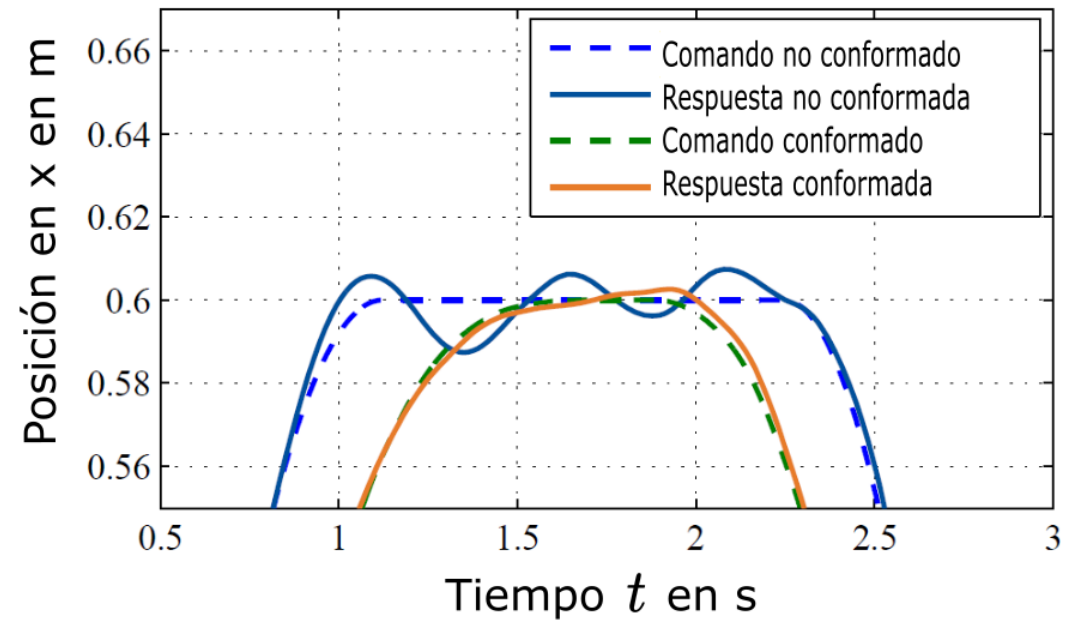
# CONTROL DEL ROBOT

## COMANDOS CON MISMA DURACIÓN

### Comandos de Entrada



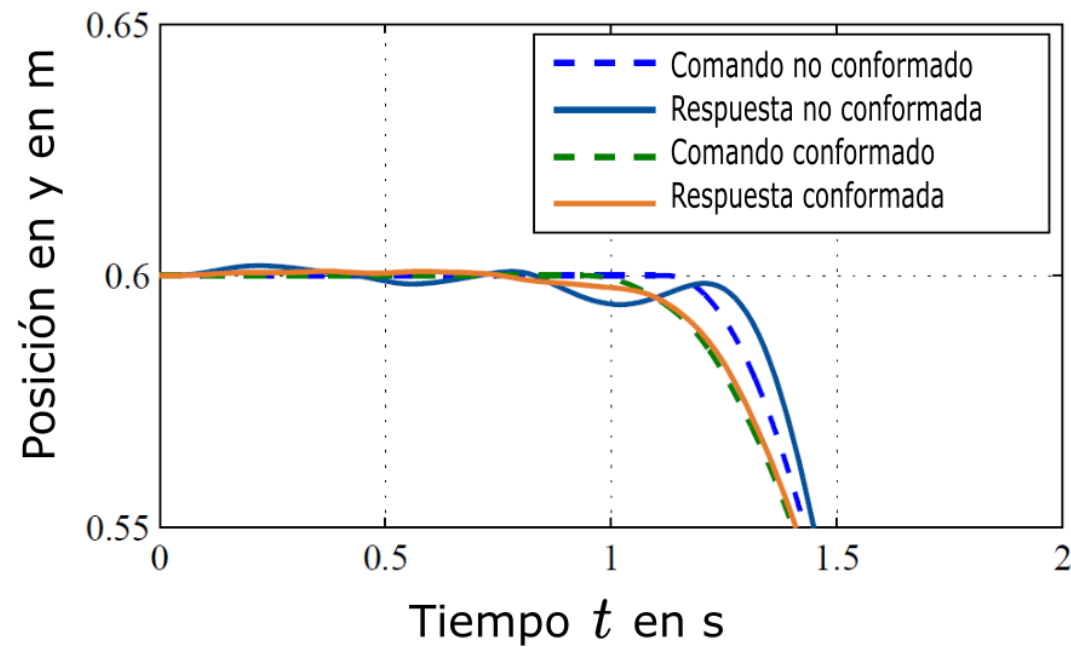
### Respuestas en X



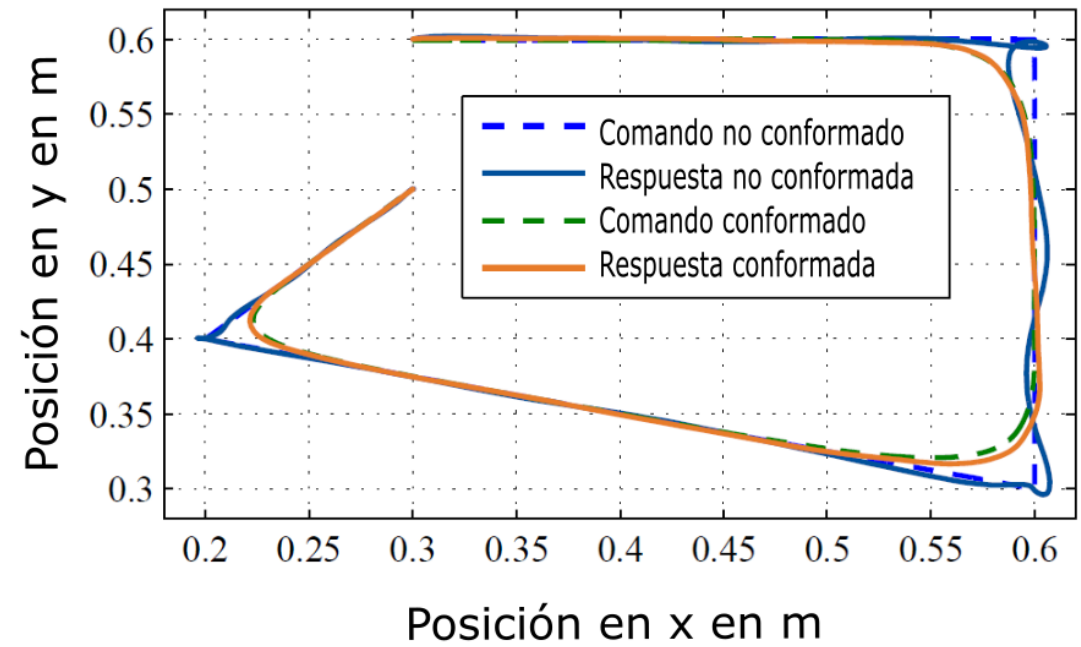
# CONTROL DEL ROBOT

## COMANDOS CON MISMA DURACIÓN

### Respuestas en Y



### Trayectoria





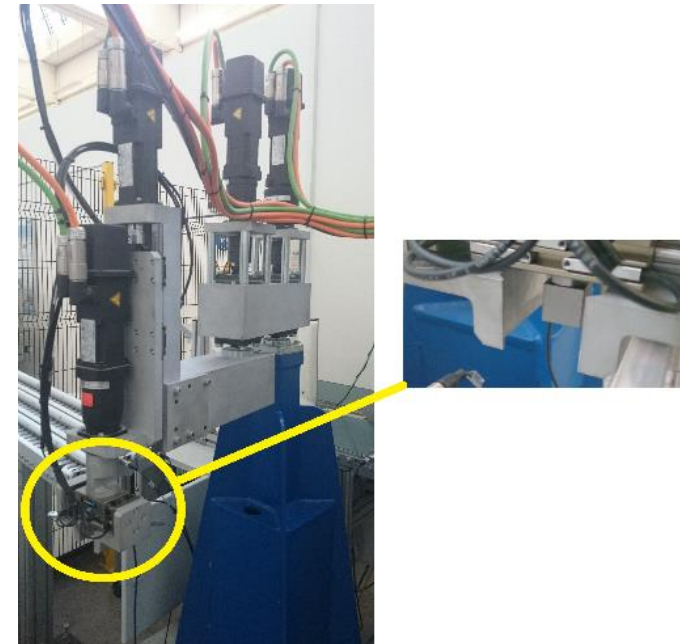
# PRUEBAS Y RESULTADOS

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS

Acelerómetro



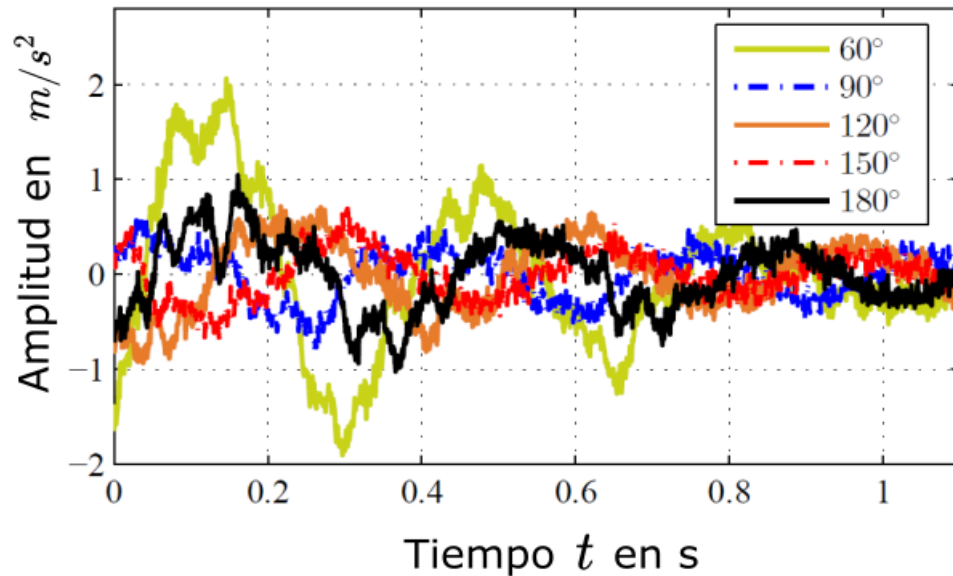
Acelerómetro en TCP



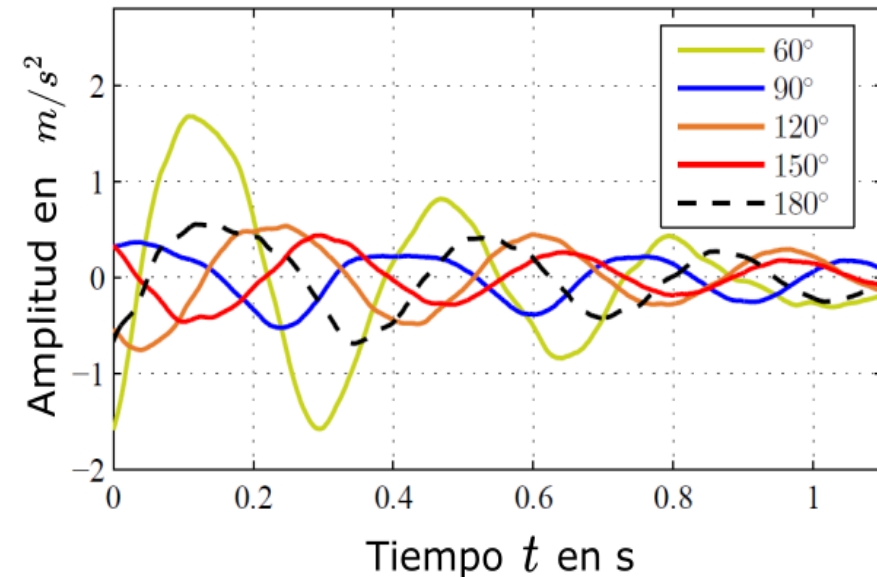
# PRUEBAS Y RESULTADOS

## ANÁLISIS DE DATOS

Aceleración residual medida en diferentes ángulos de  $\theta_2$



Datos de la aceleración después de ser filtrados por un filtro Savitzky-Golay

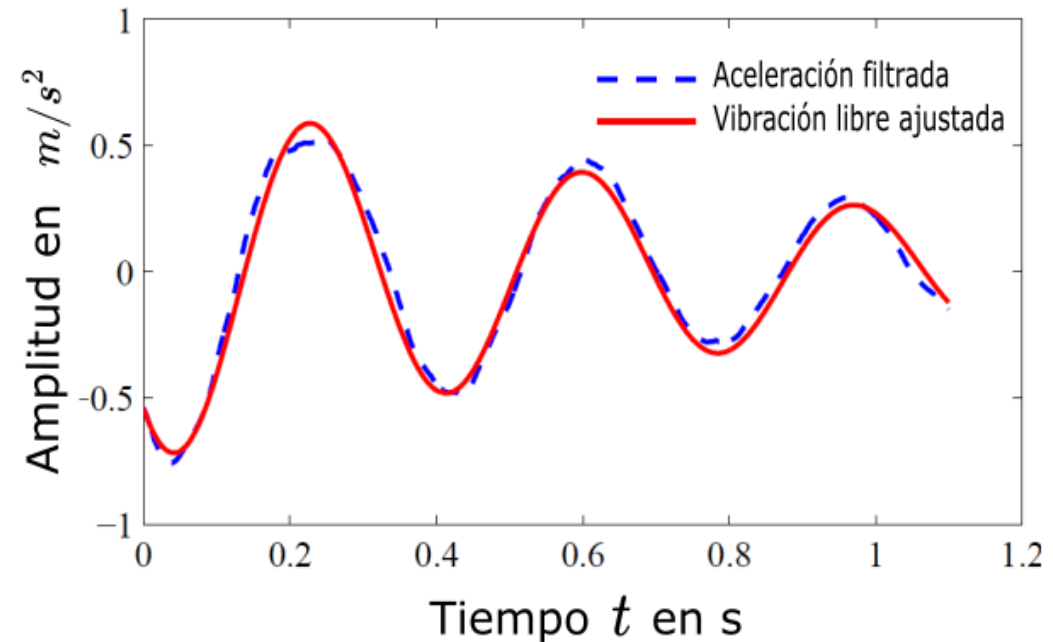


# PRUEBAS Y RESULTADOS

## CURVA AJUSTADA A ACELERACIÓN

- Ecuación de Aceleración Residual

$$a(t) = C_1 e^{-\zeta\omega t} \cos(\omega_d t + \psi_1)$$



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## VALORES MEDIDOS

| Ángulo | $\omega$ en rad/s | $\zeta$ |
|--------|-------------------|---------|
| 60°    | 18.4              | 0.12    |
| 90°    | 17.6              | 0.08    |
| 120°   | 16.9              | 0.06    |
| 150°   | 16.9              | 0.07    |
| 180°   | 17.1              | 0.09    |



$$\omega = 17.68 \text{ rad/s} \pm 5\%$$

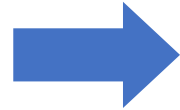
$$\zeta = 0.09 \pm 31\%$$



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

$$G(s) = \frac{K_s \omega^2}{s^2 + 2\zeta \omega s + \omega^2}$$



- ZVD
- 1H-EI
- 3H-EI



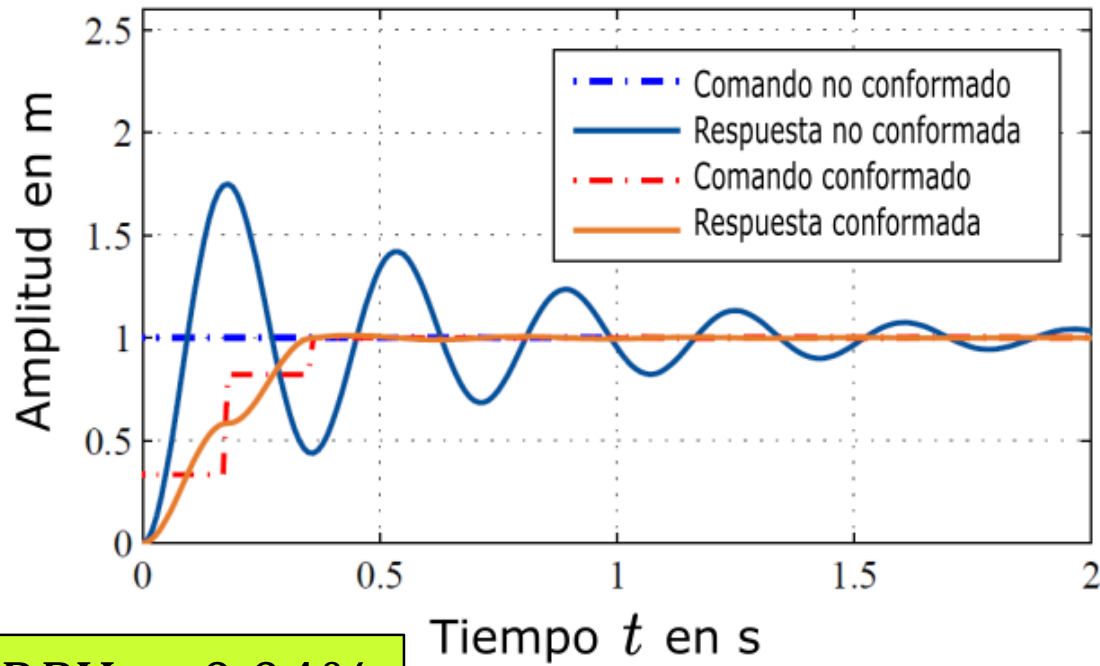
$$G(s) = \frac{312.52}{s^2 + 3.22 s + 312.52}$$



# PRUEBAS Y RESULTADOS

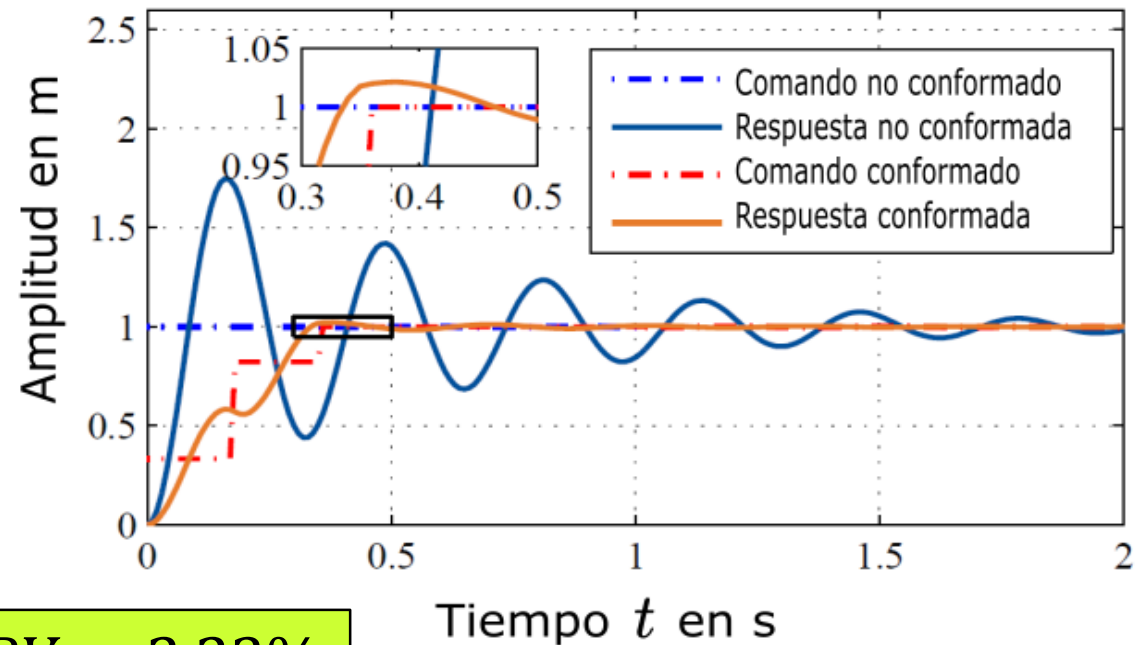
## RESULTADOS DE CONFORMADOR ZVD

### Frecuencia Natural Exacta



$PRV = 0.04\%$

### Frecuencia Natural +10%



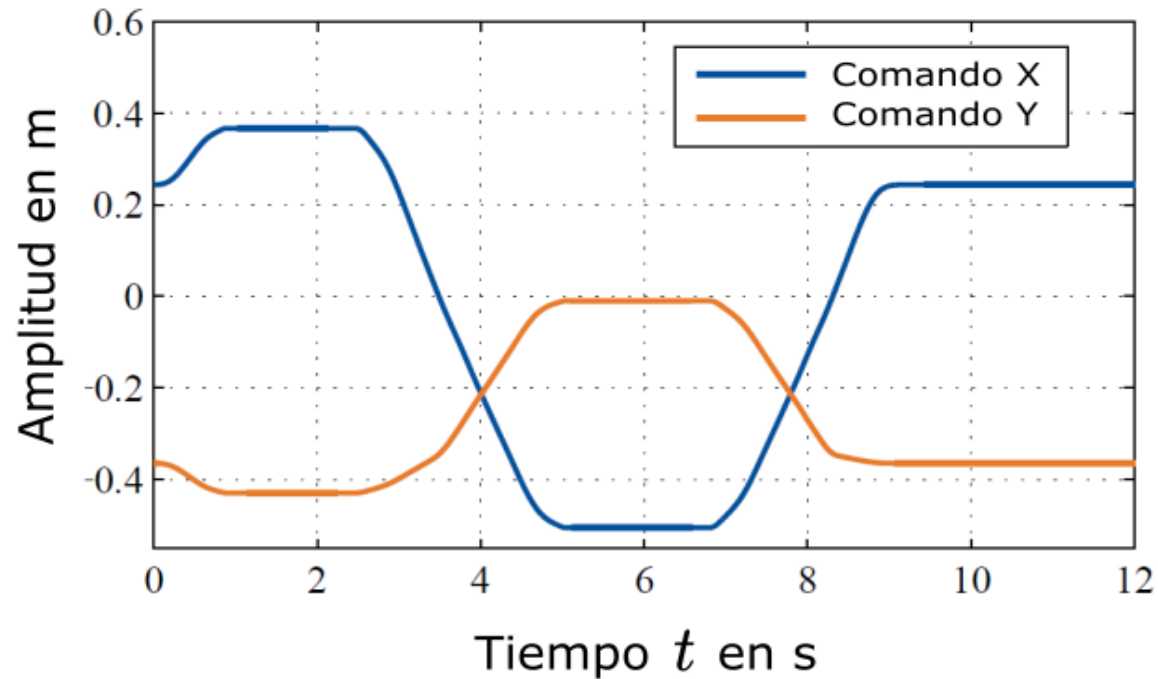
$PRV = 2.23\%$



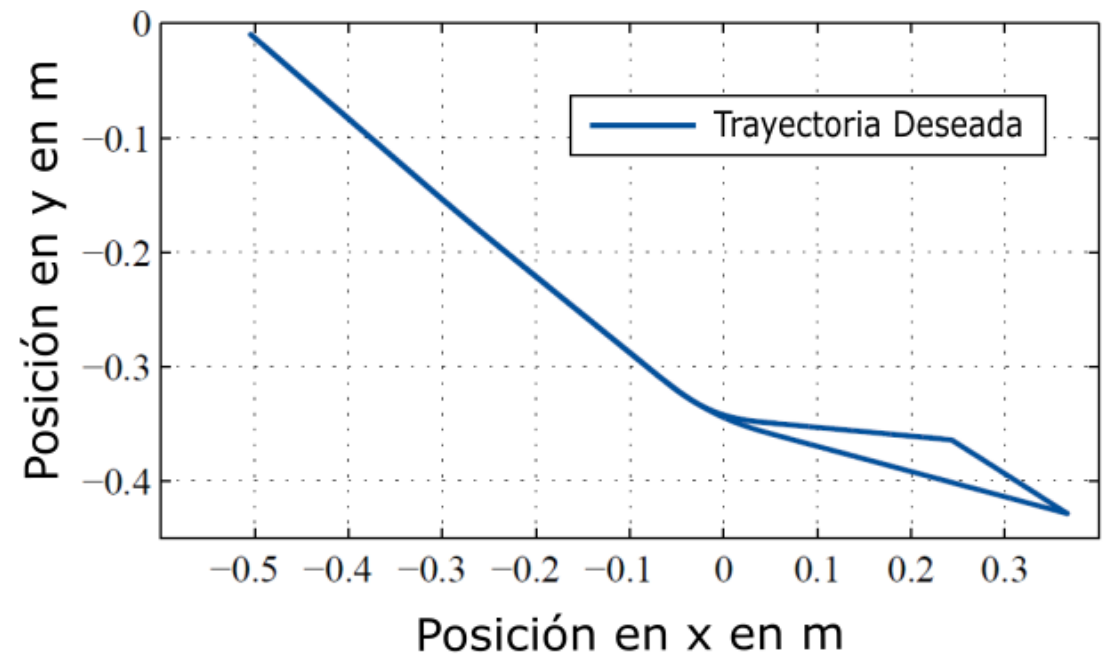
# PRUEBAS Y RESULTADOS

## PLANEACIÓN DE TRAYECTORIA

### COMANDOS X Y Y



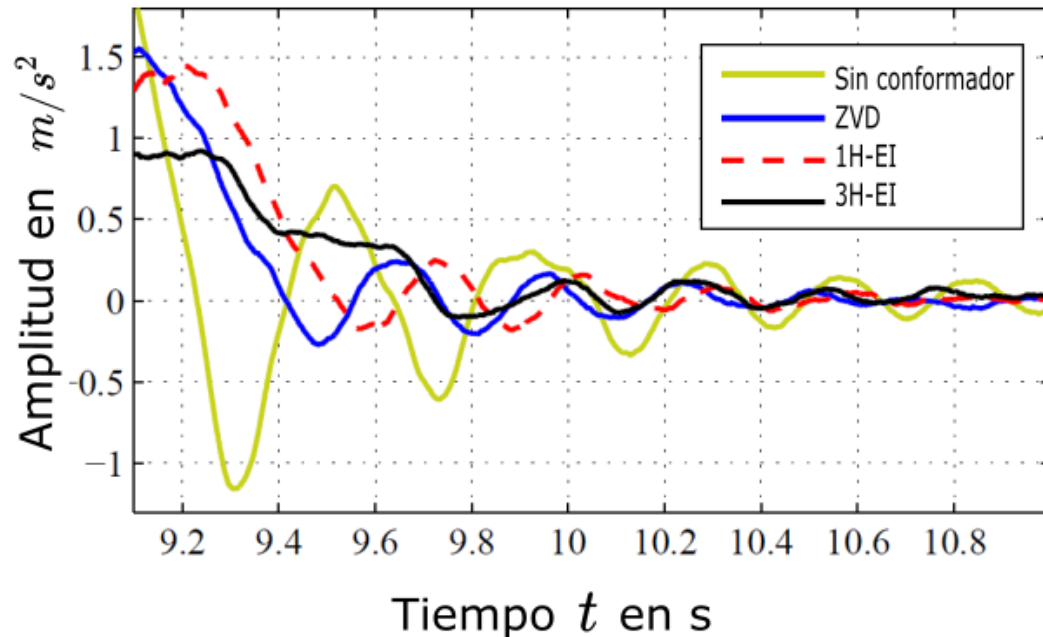
### TRAYECTORIA



# PRUEBAS Y RESULTADOS

## RESULTADOS

### ACELERACIÓN DEL TCP AL FINAL DEL MOVIMIENTO



| Conformador   | Retardo en s | Aceleración $m/s^2$ | Porcentaje de Reducción de Aceleración en % |
|---------------|--------------|---------------------|---|
| No Conformado | 0            | 1.158               | 0   |
| ZVD           | 0.168        | 0.2706              | 76.63                                       |
| 1H-EI         | 0.251        | 0.1719              | 85.15                                       |
| 3H-EI         | 0.451        | 0.1043              | 90.1  |





# VIDEO

<https://youtu.be/NSiXylCixw4>



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# CONCLUSIONES

Las oscilaciones en robots pueden llevar a pérdidas en la calidad y tiempo en las líneas de producción. Una técnica económica para resolver este problema es la conformación de entrada.

El sensor acelerómetro puede ser utilizado para medir aceleraciones residuales y por lo tanto encontrar los valores para calcular los impulsos y tiempos de los conformadores.

La técnica ZVD fue aplicada al robot SCARA y para reducir aún más las oscilaciones se utilizaron otras técnicas, estas fueron 1H-EI y 3H-EI. Los resultados mostraron que con un conformador 3H-EI la aceleración residual es reducida a un 90.1%



# CONCLUSIONES

Los conformadores trabajaron apropiadamente en los modelos aproximados del robot

El sensor acelerómetro no proporciona suficientes datos como para calcular una trayectoria aproximada real del robot, por lo tanto los datos no son adecuados para demostrar la reducción de oscilaciones durante la ejecución de trayectorias

Cuando el robot realiza el proceso de Pick and Place, en sus posiciones estacionarias, activa el tercer y cuarto eje, además del efector final, esto en conjunto podría generar oscilaciones y alterar los resultados esperados.



# RECOMENDACIONES

Si se encuentran más de una frecuencia en el robot, para mejorar el control, será necesario aplicar una técnica de conformación de entrada para varios modos de vibración

Si se requieren medidas mucho más precisas de la posición del TCP para crear un modelo más preciso, será necesario utilizar un acelerómetro con un giroscopio, con este sensor es posible medir trayectorias en el espacio.

Recordar que si el robot tiene características flexibles en sus eslabones, ya sea por la longitud de los mismos o por el material netamente flexible, el modelo propuesto en esta tesis no sería útil y debería modelarse la flexión en los eslabones.



# RECOMENDACIONES

Para aplicar y estudiar las técnicas de conformación de entrada, es recomendable realizar trayectorias con cambio de dirección, pues los efectos de la técnica son más notorios.

Si las mediciones demuestran un cambio en la frecuencia dependiendo del ángulo de los actuadores del robot, las técnicas de conformación pueden modificarse dependiendo de las trayectorias a realizarse

Se recomienda utilizar un conformador con el doble de robustez de lo necesario teóricamente.



# TRABAJO FUTURO

- El método llamado “Conformación de Entrada sin Retardo de Comandos para Movimientos Suaves de Robots Industriales” podría ser útil para eliminar el tiempo que aparece luego de la convolución en la señal de entrada. Los autores de este método aseguran inclusive que las trayectorias no sufren alteraciones.



MUCHAS GRACIAS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA